

Evaluación técnica, ambiental y económica, de pavimentos asfálticos drenantes en Colombia.

Juan Simón González Gómez

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

Sergio Alfredo Cifuentes Mosquera



**UNIVERSIDAD EIA
PROGRAMAS ACADÉMICOS EN LOS QUE SE ENMARCA
ENVIGADO
2017**

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	10
1. PRELIMINARES	11
1.1 Planteamiento del problema	11
1.2 Objetivos del proyecto	14
1.2.1 Objetivo General	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
Marco de referencia	15
1.2.3 Antecedentes	15
1.2.4 Marco teórico	17
2. METODOLOGÍA	24
2.1 Caracterización de los materiales.....	24
2.1.1 Ensayo granulométrico	24
2.1.2 Ensayo gravimétrico	24
2.1.3 Ensayos de resistencia	25
2.1.4 Ensayo Morfológico	26
2.1.5 Ensayo Densidad Bulk y Porcentaje De Vacíos	28
2.1.6 Ensayo de permeabilidad	28
2.2 DISEÑO	29
2.2.1 Generalidades del diseño	29
2.2.2 Diseño hidrológico	31

2.2.3	Diseño estructural	34
3.	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	45
3.1	Memorias de calculo diseño estructural	45
3.1.1	Ubicación y caracterización del suelo.....	45
3.1.2	Módulo de resiliencia (M_R) del suelo.....	46
3.1.3	Confiabilidad (R) y Desviación estándar normal (Z_R)	47
3.1.4	Desviación Estándar Combinada (S_0)	48
3.1.5	Serviciabilidad (ΔPSI)	48
3.1.6	Numero De Ejes W_{18} de 8,2 Ton	48
3.1.7	Coeficientes Estructurales (a_i)	48
3.1.8	Coeficientes De Drenaje (m_i).....	53
3.1.9	Calculo Del Numero Estructural Requerido (SN^*)	58
	Memorias de calculo diseño hidrológico	59
3.1.10	Tasa de Infiltración De la Rasante (K).....	64
3.1.11	Porcentaje De Espacios Vacíos.....	65
3.1.12	Precipitación - Volumen De Agua A Almacenar	66
3.1.13	Calculo De Espesor De Espesor De Reservorio Necesario	68
3.2	Comparación de costos	69
3.3	Evaluación comparativa de aspectos ambientales.....	71
	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	74
	REFERENCIAS.....	76
	ANEXO 1.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 Vista típica PAP tomado de (UNSHC. 2008)	18
Figura 2 Tabla de gradaciones para los niveles de la estructura PAP (UNHSC. 2008)	20
Figura 3 perdida de utilización por inclinación (NAPA, 2017)	22
Figura 4 Curvas SCS ()	32
Figura 5 ilustración tubo de desagüe (Techbrief. 2017)	34
Figura 6 Relaciones CBR vs MR (ASSHTO, 1993)	36
Figura 7 Periodos de diseño según el tipo de suelo (ASSHTO, 1993)	36
Figura 8 Factores de distribución para vías de múltiples carriles (ASSHTO, 1993)	39
Figura 9 Coeficientes de drenaje para capas de material granular (ASSHTO, 1993)	41
Figura 10 Factores de corrección aplicables al drenaje (ASSHTO, 1993).....	41
Figura 11 Valores para el nivel de confianza "R" (ASSHTO, 1993).....	42
Figura 12 Valores para la desviación normal "Z _R " (ASSHTO, 1993)	42
Figura 13 Ecuación para el calculo de "SN" (ASSHTO, 93).....	43
Figura 14 Descripción Apique (GEO2 S.A.S, 2016).....	46
Figura 15 Correlación CBR-SPT (Junta De Andalucia, 2007)	46
Figura 16 Resultados Correlación CBR-SPT	47
Figura 17 Resultado MR Sub-Rasante, fuente: Propia	47
Figura 18 Resultados Confiabilidad "R" y Desviación estándar normal "Z _R "	47
Figura 19 Resultado De Serviciabilidad, Fuente: Propia.....	48
Figura 20 Módulos Para Las Capas De La Estructura, Fuente: Propia	52
Figura 21 Coeficiente Estructural "a ₁ ", fuente: ASSHTO-93.....	52

Figura 22 Coeficiente Estructural "a2", fuente: ASSHTO-93.....	53
Figura 23 Coeficiente Estructural "a1", Fuente: ASSHTO-93.....	Error! Bookmark not defined.
Figura 24 coeficientes estructurales, Fuente: Propia	53
Figura 25 Probabilidad De Precipitación en Medellín, Fuente: (Weather Spark, 2018).....	57
Figura 26 Coeficientes De Drenaje "m _i ", Fuente: (ASSHTO, 93).....	Error! Bookmark not defined.
Figura 27 Valores De "m _i " Para Las Capas De La Estructura, Fuente: Propia	58
Figura 28 Interfaz De Calculo Método ASSHTO, Fuente: (Luis R. Vasquez, 2006)	Error! Bookmark not defined.
Figura 29, Hoja De Resultados Metodo ASSHTO, Fuente: (Luis R. Vasquez, 2006).	Error! Bookmark not defined.
Figura 30 Montaje Del Permeámetro, Fuente: Propia.....	64
Figura 31 Ensayo De Permeabilidad después de un mes. Fuente: Propia.....	64
Figura 32 Espacios Vacíos De La Muestra. Fuente: Propia	66
Figura 33 Curvas IDF Para Medellín. Fuente: (IDEAM, 2018).....	67
Figura 34 Precipitación, Fuente: propia	68
Figura 35 Altura Del Reservorio, Fuente: Propia	68
Figura 36 Tiempo De Infiltración, Fuente: Propia.....	69
Figura 37 Tabla de Costos Pavimento Tradicional. Fuente: (Concretos & Asfaltos S.A, 2018)	70
Figura 38 Tabla De Costos Pavimento Permeable. Fuente: (Concretos & Asfaltos S.A, 2018)	70
Figura 39 "Arboles Urbano" Fuente: (Ferguson. B, 2005).....	73

LISTA DE ANEXOS

pág.

RESUMEN

En Colombia se han utilizado estructuras de pavimento tradicionales por muchísimos años, estas a pesar de cumplir con su propósito de brindar una superficie de rodadura para los vehículos terrestres, no son eficientes en otros aspectos. El manejo de agua de escorrentía es un tema crucial en un proyecto de infraestructura lineal, por ejemplo, estos pavimentos tradicionales necesitan de obras complementarias de alcantarillado y canalización de aguas para la correcta disposición de estas. Este tipo de obras complementarias significan un aumento tanto en costos como en materiales requeridos. Otra problemática asociada a las estructuras de pavimento tradicionales es el transporte de agentes contaminantes por medio del agua de escorrentía hasta los afluentes naturales.

Por supuesto que se han desarrollado nuevas tecnologías que mitigan estos efectos negativos en gran medida, como lo son los pavimentos permeables los cuales permiten la infiltración del agua de escorrentía a través de su estructura para luego infiltrarse en el suelo natural. Durante este proceso de infiltración se logra filtrar gran parte de los contaminantes presentes en el agua. Además, este tipo de pavimentos permiten prescindir de obras complementarias para el manejo de agua de escorrentía lo que puede significar un ahorro en cuantos costos y materiales de construcción. Este tipo de ventajas hacen atractiva la propuesta de implementar estos pavimentos como alternativa a los que tradicionalmente se han utilizado. Para esto se hace necesario una evaluación técnica, económica y ambiental, que concluya sobre la viabilidad de implementar estas nuevas técnicas.

En este trabajo de grado se investiga y evalúa la viabilidad técnica, económica y ambiental de implementar un pavimento permeable de tipo asfáltico o PAP, por sus siglas en inglés, en una vía con flujo de tránsito medio o bajo. En conjunto con la empresa Conasfaltos S.A se caracterizó todos los materiales provenientes de la cantera bajo las normas estipuladas por el instituto nacional de vías colombiano (INVIAS 2013), para realizar el diseño de la estructura de un PAP. Esta estructura estuvo sujeta a análisis de permeabilidad, filtrado de partículas, cumplimiento técnico y una evaluación de costos. Además, se comparó los

resultados obtenidos, con los datos históricos de pavimentos tradicionales con el fin de determinar la viabilidad de implementación frente a las técnicas existentes.

Palabras clave: Pavimentos permeables, Infiltración, Espacios vacíos, Evaluación técnica.

ABSTRACT

Traditional pavement structures have been used in Colombia for many years, despite the fact that this kind of structures provide a good surface for vehicles, they aren't the most efficient kind of pavement in other aspects. Storm water management is an important aspect to have in mind during the design and operation of linear infrastructure projects, traditional pavements need additional structures, like box culverts or water canals, to accomplish an adequate water management. This kind of additional structures represent a greater amount of construction costs. Another identified problem associated with traditional pavements is the imminent risk of contamination they represent to natural water environments, due to the transportation of sediments in the surface of the pavement structures.

Newly developed technologies have proved they can mitigate these negative effects, porous asphalt pavements seem to be a good alternative for traditional pavements. This kind of pavements allow storm water to penetrate inside the structure to finally infiltrate in the natural soil. During this process many of the hazardous substances get filtrated and as water penetrates the structure, the additional structures needs for storm water management can be obviated, which means a substantial reduction in direct costs. These advantages makes PAP's attractive, unfortunately for Colombia there isn't a study that determines the technical, economical and an environmental viability to apply these pavement technics for a low or medium traffic volume road.

This study which was done altogether with the company Conasfaltos S.A, will determine de technical, economic and environmental viability to implement porous pavements in our country. The study will focus only on asphalt porous pavements, and its reach will include the materials characterization, the design of the structure and various tests, like permeability test, resistance and a costs evaluation, within others. Additionally, this kind of pavement structure will be compared with a traditional pavement to determine the differences in those specifics aspects between them.

INTRODUCCIÓN

El agua de escorrentía es el médium perfecto para que agentes contaminantes que se encuentran en la superficie de rodadura de las estructuras viales, logren llegar hasta los acuíferos naturales y zonas de acumulación de agua superficial poniendo en riesgo inminente las fuentes hídricas. Recientemente se ha hablado de la capacidad de los asfaltos porosos de degradar estas sustancias mediante el proceso de infiltración. Por otro lado, se habla de la seguridad que este tipo de pavimentos puede brindar al evacuar el agua de la capa de rodadura evitando represamientos de agua. Este trabajo pretende evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de implementar pavimentos asfálticos porosos en vías de bajos y medios volúmenes de tránsito como estrategia para evitar que algunas fuentes hídricas sean contaminadas por el agua de escorrentía y mejoramiento de infraestructura. Para esto se identificarán las principales características, limitaciones y metodologías de diseño de este tipo de estructuras viales, para luego realizar un diseño de mezcla de esta índole y poder realizar un comparativo con las estructuras viales tradicionales. Además, se busca obtener datos teóricos acerca de otro tipo de beneficios como, la reducción en la temperatura ambiente por acumulación de energía térmica, reducción en los costos de construcción ya que se puede prescindir de obras complementarias de drenaje, y por último el aumento de la seguridad para los usuarios de las vías por la mitigación del fenómeno de hidroplaneo y la generación de represamientos de agua en la capa de rodadura. se elaborará un cuadro comparativo de las características y especificaciones, de las alternativas tradicionales de pavimentación y las de pavimentos porosos, para así definir qué tan viable es llevar a cabo la propuesta.

1. PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia se han utilizado técnicas de pavimentación tradicionales por muchos años y aunque estas cumplen su propósito de brindar una superficie de rodadura que resiste cargas de tránsito, no son muy amigables con el medio ambiente. Estas mezclas asfálticas tradicionales son la vía perfecta para que agentes contaminantes tengan como destino final los acuíferos naturales y las zonas de agua superficial, al ser arrastrados por la escorrentía;

Los residuos sólidos, normalmente depositados en superficie, alcanzan la superficie freática, por medio de los líquidos provenientes de los propios residuos o el agua lluvia infiltrada a través de ellos, que arrastra todo tipo de contaminantes orgánicos e inorgánicos. (Ongley, E.D. 1997)

Aunque los pavimentos tradicionales han demostrado que cumplen como estructura vial, estos no son los más eficientes en el manejo de escorrentía e infiltración, debido a esto necesitan de elementos adicionales como sistemas de drenajes compuestos de alcantarillas y cunetas entre otros, para poder cumplir los estándares que rigen la normativa colombiana al garantizar un adecuado manejo de drenaje y subdrenaje que garantice un comportamiento satisfactorio de la estructura en el tiempo. Estas obras complementarias contribuyen a la contaminación por su demanda de concreto y acero, materiales no renovables utilizados para la construcción. Por otro lado, los pavimentos existentes contribuyen al calentamiento global, pues contribuyen a las causas de las denominadas islas de calor. “islas de calor son zonas de mayor temperatura dentro de una misma ciudad, que se generan en parte porque la ciudad es más seca que sus alrededores y porque las edificaciones acumulan energía térmica durante el día y la liberan al caer la tarde, haciendo que las primeras horas de la noche urbana sean más calientes” (Jiménez, 2015)

Adicional a esto, está el componente de seguridad para los usuarios de las vías, cuando se generan represamientos de agua en la superficie de rodadura de las carreteras, estos

ocasionan grandes riesgos para los conductores y generan desgaste acelerado a la estructura. Si un conductor que transita a alta velocidad se encuentra con un represamiento de agua, la rueda no tiene tiempo de evacuarla por su trazado, haciendo que se cree una capa entre ésta y la superficie asfáltica, este fenómeno se llama *hidroplaneo* “El *hidroplaneo* afecta gravemente la seguridad ya que conlleva a la pérdida del contacto entre la vía y la llanta, evitando que el vehículo responda a cualquier acción de reacción del conductor, ya sea dar dirección, frenar o acelerar.” (D'Alessandro, 2012) Además de ocasionar accidentes, los represamientos de agua son los causantes de que una vía se deteriore antes de lo esperado, pues esta “lava” y remueve los componentes que la comprenden, generando huecos y la famosa piel de cocodrilo, esto es cuando la carretera se siente escamosa al transitarla algo que genera incomodidad para el conductor. Evitando el represamiento de agua se podrían salvar muchas vidas y ahorrar dinero al no tener que realizar reparaciones antes del tiempo de diseño.

Los pavimentos porosos son importantes porque podrían ser la solución a muchos de estos problemas, ya que, al permitir la infiltración del agua de escorrentía evitan los represamientos de agua sobre la capa de rodadura. Además, podrían filtrar muchas sustancias malignas que afectan acuíferos naturales y finalmente reducir el calor emitido debido a su menor grado de acumulación de energía término, con respecto a las mezclas tradicionales. Pero para la implementación de estos pavimentos es de gran utilidad contar con documentación de apoyo, la cual haga referencia a una evaluación comparativa en cuanto a los aspectos más relevantes de sus características técnicas, la interacción que tiene con el componente ambiental y finalmente el costo de implementación de este nuevo tipo de pavimento, a los que tradicionalmente se han utilizado.

En conjunto con el ingeniero civil, Sergio Alfredo Cifuentes, perteneciente a la Empresa Concretos & Asfaltos S.A, se identificó que a la fecha no se ha realizado una evaluación técnica comparativa entre las estructuras de asfalto tradicionales y las que están compuestas por Pavimentos asfálticos totalmente drenantes, para vías con volúmenes de tránsitos medio y bajo. Este tipo de mezclas son una alternativa atractiva, a las que tradicionalmente se han utilizado, y es por esto que la empresa Concretos & Asfaltos S.A, le interesa investigar más sobre ellos, puesto que a pesar de solucionar algunos de los problemas ambientales existentes, estos no cuentan con un análisis comparativo con los

pavimentos tradicionales. Al ser un pavimento poroso el agua de escorrentía puede circular libremente como lo haría en terreno virgen, dirigiéndose hacia los acuíferos naturales, ya sean superficiales o subterráneos. Esto permitiría prescindir de obras de arte como; alcantarillas, cunetas, y filtros. Requeridos para el manejo de escorrentía superficial e infiltración, hay que dejar claro que las alcantarillas para paso de corrientes de agua deben continuarse haciendo. Esto hace que los costos de construcción disminuyan, y el impacto ambiental sea menor, pues no se consumirá concreto adicional para la elaboración de estas obras. Pero los beneficios no se reducen a la disminución de costos de obra y reducción de uso de concreto, algunos de los beneficios obtenidos por la empresa constructora norteamericana Topmix al implementar asfaltos drenantes han sido; “Minimiza el impacto urbano en el ciclo hídrico, filtra los hidrocarburos del agua de escorrentía, provee de agua limpia a los reservorios de agua superficial, reduce la polución en el agua lluvia, reduce la retención de calor.” (Topmix. Tarmac, 2015)

Al lograr realizar una evaluación técnica, ambiental y económica para este tipo de pavimentos. Se lograría determinar la viabilidad de implementación de estas novedosas técnicas de pavimentación y se podría lograr el uso de capas asfálticas cuyo impacto negativo al medio ambiente sean menores que las tradicionales.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de implementar pavimentos asfálticos drenantes, en vías de bajos y medios volúmenes de tránsito.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar las principales características, especificaciones, limitaciones y metodologías de diseño de los pavimentos asfálticos drenantes o porosos. Para determinar las variables de estudio a comparar con los pavimentos tradicionales.
- Diseñar un pavimento asfáltico drenante, para una vía de bajo o medio volumen de tránsito en Antioquia.
- Comparar teóricamente la alternativa de diseño del pavimento asfáltico drenante, con un pavimento asfáltico tradicional, sus ventajas y desventajas desde los aspectos técnico, ambiental y económico, para determinar la viabilidad de implementación de este tipo de pavimento.

MARCO DE REFERENCIA

1.2.3 Antecedentes

Los pavimentos permeables han Ganado fuerza y popularidad a nivel global desde la década de los 70`s, estos han tenido un gran apogeo particular en la nación americana, “los pavimentos permeables se han utilizado con éxito a lo largo del territorio de Estados Unidos, en cada clima y geografía. Estos son reconocidos por la agencia de protección ambiental como “la mejor practica en materia de manejo de agua lluvia” (NAPA. 2017). Esto se debe en gran parte a los beneficios tanto económicos, técnicos y constructivos que se obtienen una vez se implementan. A pesar de que al comparar el precio del metro lineal de pavimento tradicional con el equivalente en pavimentos PAP el segundo sea mayor, “el costo es mayor que el de pavimentos tradicionales entre un 20%-25%” (Ferguson, B. 2005), si se tomara en cuenta que este tipo de pavimentos pueden prescindir de obras de drenaje de escorrentía adicionales y que además se acoplan al terreno original, “Los pavimentos porosos están diseñados para encajar con la topografía del sitio, en general hay menos movimientos de tierra sin excavaciones profundas. ”(NAPA. 2017) el costo sería comparable, aumentando la competitividad de los pavimentos PAP frente a los tradicionales. “El coste total del proyecto es comparable para el asfalto poroso con infraestructura reducida para el manejo de la precipitación VS las técnicas tradicionales de pavimento donde se requiere la infraestructura para el manejo de la precipitación.” (UNHSC. 2008).

Por otra parte, la producción y construcción de pavimentos tipo PAP, es tan simple o complicado como la de cualquier tipo de pavimento convencional “Construir los pavimentos porosos de asfalto es un método directo. Cualquier contratista calificado puede construir tales pavimentos y virtualmente cualquier planta del asfalto puede producir el material. No se necesita un certificado adicional” (NAPA. 2017). El poder adaptar los procesos y las maquinas ya existentes para la producción y construcción de pavimentos tradicionales, a técnicas PAP sin mayor costo incrementa la viabilidad técnica.

Por lo general los pavimentos PAP se han implementado como alternativa a los pavimentos tradicionales en zonas con presencia de bajos volúmenes de tránsito, y donde las cargas no son significativas, como parqueaderos de carros livianos y zonas residenciales entre otros. pero esto no debería ser una limitante, “existen experiencias recientes en la

subdivisión de Pringle Creek en Salem, Oregon, en donde el pavimento permeable fue sometido a cargas pesadas como camiones de construcción, sin signos de rotura ni falla” (NAPA, 2017). Este tipo de experiencia hacen que el ábaco de posibilidades de aplicación para estas técnicas de pavimentos se expanda significativamente.

En el año 2013 las ingenieras Alejandra Trujillo y Diana Quiroz, ambas egresadas de la universidad javeriana, de Bogotá, realizaron su trabajo de grado, enfocado en la investigación de los pavimentos porosos, como una alternativa de sistema de drenaje urbano. Luego de culminar su investigación, las ingenieras, concluyeron varias cosas acerca del mantenimiento que debe tener el tipo de estructura en cuestión. Algunas de estas conclusiones describen procesos iterativos que podrán jugar en contra de la viabilidad de la propuesta, pues estos procesos de mantenimiento son irrelevantes para las estructuras de pavimentos tradicionales, pero completamente necesarias para el buen funcionamiento de los pavimentos porosos. “Debido a la importancia que tiene la colmatación en la permeabilidad de los pavimentos porosos, se debe garantizar el mantenimiento del mismo, por lo cual en nuestro medio este factor podría ser una limitante para la aplicación de este sistema de drenaje alternativo de manera generalizada y a escalas urbanas importantes.” (Trujillo, A. 2013) como consecuencia de falencia las ingenieras sugieren que “Se deben remover los sedimentos del sistema al menos anualmente para prevenir el deterioro del rendimiento del pavimento...”(Trujillo, A. 2013) Estas prácticas repetitivas afectan directamente el costo por mantenimiento de la estructura, y al incrementar costos por mantenimiento la propuesta es menos viable.

En Colombia la cementera Argos tuvo un acercamiento a las tecnologías de materiales permeables, actualmente cuenta con una línea de concretos avanzados, uno de los productos que la compañía ofrece es el concreto permeable;

El Concreto Permeable de Argos es un concreto diseñado con una mezcla especial y cuidadosa de materias primas con altas especificaciones (agregado grueso, materiales cementantes, agua y aditivos), que entregan un material con la capacidad de permitir el paso para almacenamiento o infiltración del agua proveniente de diversas fuentes, en especial el agua de escorrentía. (Argos, 2014)

Este producto tiene el mismo funcionamiento que los pavimentos en cuestión, y sus cualidades ambientales son similares, a pesar de esto no han sido evaluados técnica, ambiental o económicamente frente a los pavimentos tradicionales.

Por otra parte, está la empresa constructora “Tarmac Topmix” esta empresa es líder en el mercado de los pavimentos asfálticos porosos. En su ficha técnica de especificaciones para estructuras de este tipo, aseguran que su producto conlleva grandes beneficios frente a los pavimentos tradicionales “Efficient stormwater management, environmental management, reduced costs, ease of placement, aesthetic appeal.” (Tarmac, 2015) Si la estructura de estudio efectivamente cumple con estas condiciones a favor, el sobre costo por mantenimiento se contrarresta con las ganancias que estos beneficios traerían, es de vital importancia realizar un análisis de costo que permita evaluar las condiciones a favor y en contra.

1.2.4 Marco teórico

Concepto general y estructura de los pavimentos permeable:

Los pavimentos porosos o permeables fueron diseñados específicamente para incrementar la infiltración en el suelo del agua de escorrentía y disminuir la cantidad de contaminantes que se depositaban en los cuerpos de agua naturales, a causa de la misma escorrentía que transporta sedimentos, grasas e hidrocarburos que se encuentran en las vías y sistemas de descarga existentes. El funcionamiento de este tipo de pavimentos a pesar de parecer básico es bastante innovador, a diferencia de los pavimentos tradicionales los cuales buscan evacuar el agua de la superficie hacia los lados mediante una inclinación en la capa asfáltica denominada bombeo para luego encaminarla en las cunetas que se dirigen al sistema de alcantarillado y finalmente a los acuíferos naturales; los pavimentos permeables permiten el paso del agua de escorrentía a través de su estructura multicapa hasta llegar al fondo donde se encuentra un reservorio, donde el agua puede permanecer por el tiempo que sea necesario para infiltrarse en el suelo natural. A medida que ocurre este proceso, los contaminantes presentes en el agua van siendo filtrados por las diferentes capas de la estructura y el suelo.

En la actualidad existen varios tipos de pavimentos permeables los cuales se podrían agrupar en tres grandes categorías: pavimentos de concreto permeable, pavimentos de asfalto permeable y pavimentos articulados permeables, o PCP, PAP y PICP respectivamente por sus siglas en ingles. La principal diferencia entre estas categorías es el material que se implementa para el diseño y construcción de la superficie de rodadura, esto causa que “El proceso del diseño estructural cambiara de acuerdo con el tipo de pavimento que se escoja” (Caltrans. 2014). Esta investigación se enfoca en estudiar la viabilidad técnica económica y ambiental de los pavimentos tipo PAP. Para entender el concepto general de estos se hace necesario describir su estructura interna. De igual manera que los pavimentos tradicionales, los permeables están compuestos por un sistema multicapa el cual debe soportar las cargas máximas de diseño y a la vez cumplir con las características particulares de un pavimento de esta índole. A continuación, se presenta una vista típica de la sección transversal de un PAP.

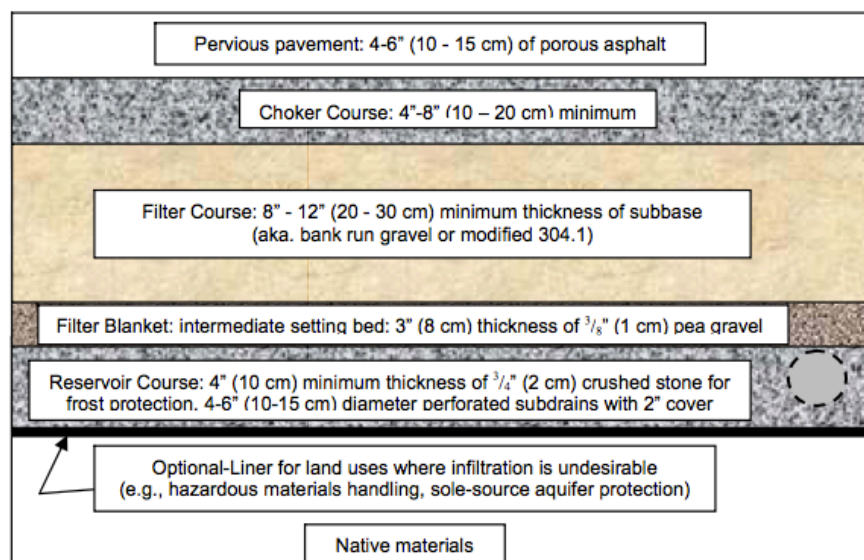


Figura 1 Vista típica PAP tomado de (UNSHC. 2008)

La primera capa o la capa superficial es la carpeta asfáltica que se compone de material bituminoso y agregados pétreos, su espesor puede variar entre los 10cm-15cm. El diseño

de esta es similar al que se realizaría en un pavimento tradicional, pues debe ser resistente a cargas de diseño para evitar la rotura por sobrecarga o la falla por fatiga, además debe tener el coeficiente de permeabilidad adecuado para que todo el volumen de escorrentía se infiltre en el tiempo precisado. Se debe verificar el cumplimiento por compactación del 95%. La segunda capa de la estructura se denomina “Base” compuesto por material granular el cual debe cumplir con ciertos parámetros mínimos tales como “pérdida máxima por lavado del 0.5%, índice mínimo de la durabilidad de 35 y pérdida máxima de la abrasión del 10% para 100 revoluciones” (UNHSC. 2008). Esta hace las veces de cama base para la capa asfáltica brindando una superficie adecuada para la pavimentación que, además, confina el material que se encuentra por debajo y transmite las cargas de manera eficiente a los niveles inferiores de la estructura. “La Gradación de la zona de ahogo debe cumplir con lo establecido en AASHTO No. 57, aunque también es apropiada la gradación descrita en AASHTO no. 3 (UNHSC. 2008). El tercer nivel de la estructura es el filtro que también aporta resistencia para la base granular. Se compone de grava, además de resistir, distribuir y transmitir cargas, evita que el agua hacienda a los niveles superiores por capilaridad. “El material del filtro tendrá una conductividad hidráulica (también designada como el coeficiente de permeabilidad) de 10 a 60 pies/día, a una compactación estándar del 95%” (UNHSC. 2008). Es importante que los niveles de compactación sean los adecuados ya que una sobre compactación generaría variaciones indeseadas en la permeabilidad de la estructura. Para lograr obtener una gradación apropiada se hace uso de correlaciones, “una ecuación tal que relaciona la gradación con la permeabilidad, como la que se describe en *correlaciones de permeabilidad y tamaño de grano*” (Shepherd, 1989). Entre el filtro y el reservorio se encuentra una capa intermedia cuya función principal es evitar la transferencia de material entre capas contiguas, esta al igual que las descritas anteriormente se compone de material granular. En cuanto a la gradación “debe ser calculada basándose en las gradaciones seleccionadas para el filtro y el reservorio, usando los criterios resaltados en *HEC 11*” (Brown and Clyde, 1989). Por último, se encuentra el reservorio cuya función es retener agua mientras que esta se infiltra en el suelo, además, provee resistencia a las cargas a modo de sub-base granular cuando sea necesario. La gradación para esta capa puede regirse según lo establecido en la AASHTO No. 3 “si no se puede cumplir con lo especificado por AASHTO No 3, entonces lo especificado en AASHTO No. 5 es aceptable siempre y cuando se cuente con la aprobación del ingeniero a cargo” (NAPA. 2017)

El uso de geotextiles en este tipo de pavimentos se considera como un opcional, pues en algunas ocasiones resulta ser contraproducente su implementación. “El uso de tela-filtro en el filtrado de agua de escorrentía es conocido por su prematura colmatación”. (NAPA. 2017) Por otra parte, se recomienda su uso en sitios donde no se desea tener infiltración de agua en el suelo, como zonas aledañas a cimentaciones de construcciones debido a los cambios en las características del suelo en presencia de agua.

Se presenta a continuación la tabla de gradación recomendada por la AASHTO para cada uno de los niveles de la estructura.

US Standard Sieve Size Inches/mm	Percent Passing (%)			
	Choker Course (AASHTO No. 57)	Filter Course (Modified NHDOT 304.1)	Reservoir Course (AASHTO No. 3)	Reservoir Course Alternative* (AASHTO No. 5)
6/150	-	100	-	
2½/63	-		100	-
2 /50	-		90 – 100	-
1½/37.5	100		35 – 70	100
1/25	95 - 100		0 – 15	90 – 100
¾/19	-		-	20 - 55
½/12.5	25 - 60		0 - 5	0 - 10
3/8/9.5	-		-	0 - 5
#4/4.75	0 - 10	70-100	-	
#8/2.36	0 - 5		-	
#200/0.075		0 – 6**		
% Compaction ASTM D698 / AASHTO T99	95	95	95	95

Figura 2 Tabla de gradaciones para los niveles de la estructura PAP (UNHSC. 2008)

Más adelante en el capítulo de metodología se profundizará sobre las especificaciones, coeficientes y dimensiones que son necesarios para el diseño de estos elementos de la estructura.

Limitaciones de implementación:

Las estructuras de pavimento permeable tienen ciertas limitaciones para su aplicación, el sitio de construcción impone algunas de estas limitaciones. Para comenzar y como es de esperarse la permeabilidad del suelo es un condicional importante al momento de evaluar la viabilidad para esta propuesta, si la permeabilidad del suelo es muy baja, las dimensiones deberán ser grandes para almacenar el agua por un periodo de tiempo mayor al deseable para su completa infiltración, el cual oscila entre 24-72 horas. Las dimensiones de la estructura están directamente relacionadas con el costo, pues se necesitará más material de relleno para ocupar el espacio del reservorio, finalmente la viabilidad se verá afecta por el costo. Por otra parte, la inclinación de la zona en estudio impone otra limitante, “la pendiente máxima de la superficie debe estar limitada a 5%.” (Napa. 2017). La inclinación máxima se debe limitar por varias razones, como se demuestra en la siguiente imagen, si el terreno es muy inclinado el área superficial efectiva que infiltrara agua disminuirá significativamente, haciendo que el diseño sea ineficiente. Complementario a esto, se presenta otra limitante relacionada con la inclinación del terreno puede hacer que la estructura vial tenga una utilización menor a la cual se estipulaba, ya que por la gravedad la masa del agua caerá por la pendiente acumulándose en uno de los extremos. La siguiente imagen sirve como referencia para ilustrar lo antes mencionado.

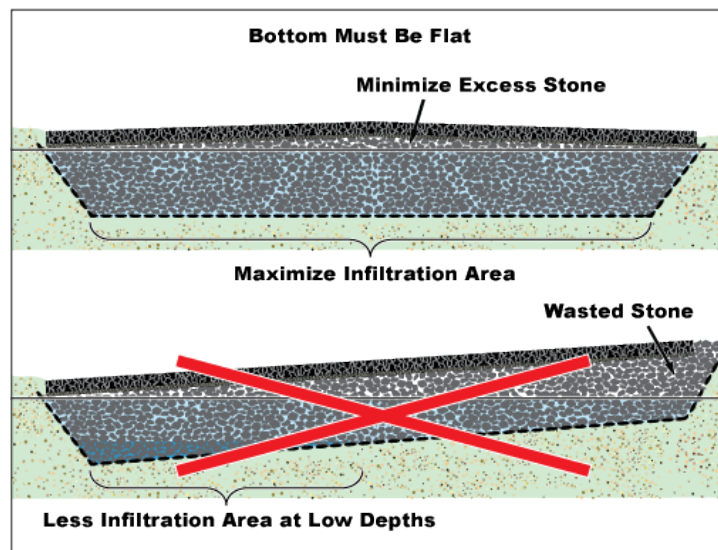


Figura 3 pérdida de utilización por inclinación (NAPA, 2017)

Adicional a esto, “El uso de pavimentos porosos debe evitarse en zonas donde se pueda presentar derrames de sustancias altamente contaminantes o inflamables como el combustible.” (TechBrief, 2015). Los pavimentos PAP se deben evitar cuando se presente esta condición debido al potencial desastre ambiental que se puede generar a causa de un derramamiento, pues si bien se ha resaltado la capacidad de filtrado que poseen los PAP cuando se da el ingreso de un volumen considerable de una sustancia peligrosa, se produce un efecto contrario y negativo al cual se ha descrito con anterioridad, pues la sustancia con una alta concentración de contaminante recorrerá toda la estructura permeable hasta depositarse en la rasante sin compactar, donde lentamente se infiltrara posiblemente contaminando el suelo y la vegetación del lugar.

Agentes contaminantes en la escorrentía:

El agua lluvia es el medio de transporte ideal para que algunas sustancias contaminantes tengan como destino final los acuíferos naturales y aguas subterráneas entre otros. “La escorrentía urbana ha sido identificada como una de las principales causas de degradación de las aguas receptoras debido a que esta contiene una gran variedad de contaminantes, influenciando la calidad de los cuerpos receptores” (Luo et al., 2009). Entre estos agentes contaminantes se pueden encontrar, solventes, hidrocarburos, metales, sólidos en

suspensión, aceites, pesticidas y más. Si estas sustancias no son correctamente degradadas durante el proceso de infiltración, pueden poner en riesgo los recursos hídricos.

Colmatación en la estructura del pavimento:

La infiltración de agua, a través de la estructura, se da gracias a que la curva granulométrica de la misma describe un comportamiento atípico en donde se pretende que los tamaños de las partículas que la componen, sean lo suficientemente grandes para generar espacios entre ellas, permitiendo que el agua circule entre estos. La colmatación se da cuando partículas de sedimento son arrastradas por el agua y se depositan en estos espacios vacíos, interfiriendo con el flujo del agua, y reduciendo drásticamente la capacidad de drenaje del pavimento.

2. METODOLOGÍA

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Generalidades de la caracterización de materiales

La caracterización de los agregados debe realizarse a muestras fidedignas, que mediante procesos normalizados se asegure que indiquen la verdadera naturaleza y las características reales de los materiales representados por ellas. (Instituto nacional de vías, 2013)

El cuarteo para mezclas de agregados finos y gruesos se realizará mediante el método A especificado por el instituto nacional de vías, el cual establece que este procedimiento se deberá realizar mediante un cuarteador mecánico.

2.1.1 Ensayo granulométrico

INV E-213-13

Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino

Una muestra de agregado seco, de masa conocida, se separa a través de una serie de tamices de aberturas progresivamente más pequeñas, con el fin de determinar la distribución de los tamaños de sus partículas.

El porcentaje retenido en cada tamiz y aquel que pasa se calculan de la siguiente manera respectivamente.

$$\%retenido = (\text{peso retenido}[g] * 100) / \text{peso total } [g]$$

$$\%que \text{ pasa} = \% \text{ que pasa tamiz anterior} - \% \text{ retenido tamiz actual}$$

2.1.2 Ensayo gravimétrico

INV E -223- 13

Densidad, densidad relativa (Gravedad Específica)

Por medio de este ensayo se determina la gravedad específica de los agregados pétreos, esta es la relación entre la densidad de un material y la densidad del agua una temperatura indicada. Su valor es adimensional. (Instituto nacional de vías, 2017)

El cálculo de este parámetro es de gran importancia al momento de evaluar el volumen de espacios vacíos de un muestra de agregado pétreo. La formulación para este ensayo es la siguiente.

$$G_{sh} = \text{Masa seca al horno} / (\text{Masa superficialmente seca} - \text{masa de la muestra saturada})$$

2.1.3 Ensayos de resistencia

INV E-220-13

Solidez frente a soluciones de sulfato de sodio o magnesio

Esta norma describe el procedimiento a seguir para determinar la resistencia de los agregados pétreos cuando deben soportar la intemperie en concretos y otras aplicaciones. (Instituto nacional de vías, 2017)

Ya que el material granular estará sometido constantemente a condiciones de intemperie es importante definir la resistencia y por lo tanto la interacción que este tendrá con los agentes que pueda transportar el agua.

INV E-219-13

Resistencia a la degradación mediante la máquina de los ángeles

Este ensayo mide la degradación de un agregado, como resultado de una combinación de acciones que incluyen abrasión, impacto y molienda en un tambor giratorio que contiene una determinada cantidad de bolas de acero. (Instituto nacional de vías, 2013)

Dicho desgaste se expresa como el porcentaje de masa seca que se pierde durante el ensayo. Calculada de la siguiente manera.

$$\% \text{ de desgaste} = (P1 - P2) * 100 / P1$$

Donde:

P1=masa de la muestra en seco, antes del ensayo.

P2= masa de la muestra en seco, después del ensayo.

INV E -224-13

Determinación del valor del 10% de finos

Esta norma cubre el procedimiento para evaluar la resistencia mecánica de un agregado grueso al aplastamiento cuando es sometido a un esfuerzo de compresión, determinado la carga necesaria para que el agregado 10% de finos. (Instituto nacional de vías, 2013)

Este ensayo da un índice sobre qué tan resistente es el agregado a cargas de compresión, cargas a las cuales estará sometida la estructura constantemente. El resultado del mismo se presenta como la fuerza necesaria para producir el 10% de finos y se calcula de la siguiente manera.

$$F=14*f / (m+4)$$

Donde:

F= Fuerza en kN.

m= porcentaje de material que pasa el tamiz de 2.36mm a la máxima fuerza,
($m=100M_2/M_1$)

2.1.4 Ensayo Morfológico

INV E- 240-13

Proporción de partículas planas y alargadas

Esta norma se refiere a la determinación del porcentaje de partículas planas, alargadas o planas y alargadas, en un agregado grueso. (Instituto nacional de vías, 2013) Para este ensayo se miden partículas individuales de agregado, para determinar las relaciones ancho/espesor, largo/ancho o largo espesor.

Las partículas planas y alargadas tienden a ceder más fácil ante los esfuerzos que aquellas que no lo son, por esta razón es importante controlar la proporción de estas. Los resultados se presentan como porcentajes de cada tamaño de tamiz.

INV E-227-13

Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso

Se entiende como cara fracturada una superficie angulosa, áspera o quebrada de una partícula de agregado, formada por trituración, por otros medios artificiales o por la naturaleza. (Instituto nacional de vías, 2013) Mantener una alta proporción de caras fracturadas es importante debido a que esta condición aumenta la resistencia al corte por fricción.

Antes de comenzar el ensayo se debe determinar un número mínimo de caras fracturadas por partícula, para su aceptación. Los resultados se presentaran en forma de porcentaje y se calcularan de la siguiente manera.

$$P = F / (F+N) * 100$$

Donde:

P=porcentaje de partículas que cumplen con el criterio.

F= masa o número de partículas que cumplen el criterio.

N= masa o numero de partículas que no cumplen el criterio.

2.1.5 Ensayo Densidad Bulk y Porcentaje De Vacíos

INV E-217-13

Esta norma tiene por objeto establecer el método para determinar la densidad bulk (peso unitario) de agregados finos, gruesos o una mezcla de ambos... y para calcular los vacíos con base en la misma determinación. (Instituto nacional de vías, 2013)

La densidad bulk de un agregado es equivalente al peso unitario del mismo, este incluye el volumen de las partículas individuales y el volumen de los vacíos entre ellas. Para los cálculos se utilizan las siguientes formulas.

$$\text{Densidad Bulk} = \frac{\text{masa del agregado y recipiente} - \text{masa del recipiente}}{\text{Volumen del recipiente}}$$

$$\% \text{ vacios} = [(s * p_w) - M] / (s * p_w) * 100$$

Donde:

S= gravedad especifica bulk

M= densidad bulk de los agregados

Pw= densidad del agua

2.1.6 Ensayo de permeabilidad

INV E – 130- 13

Permeabilidad de suelos granulares (Cabeza constante)

Este método de ensayo describe un procedimiento para determinar el coeficiente de permeabilidad mediante un método de cabeza constante para el flujo laminar de agua a través de suelos granulares.

Para este ensayo se establecen algunas condiciones ideales prerequisites para el flujo laminar.

1 Continuidad de flujo sin cambios en el volumen del suelo.

2 Flujo con los vacíos del suelo saturados con agua y sin burbujas de aire dentro de los mismos.

3 Flujo uniforme sin cambios en el gradiente hidráulico.

Una vez se cumplan estas condiciones se calcula el coeficiente de permeabilidad de la siguiente manera.

$$K = (Q \cdot L) / (A \cdot t \cdot h)$$

Donde:

K= coeficiente de permeabilidad.

Q= cantidad de agua descargada.

L=Distancia entre manómetros

A= Area de la sección transversal del espécimen

t= tiempo total de descargue

h= diferencia de cabeza en los manómetros

2.2 DISEÑO

2.2.1 Generalidades del diseño

El diseño de la estructura debe satisfacer varios requisitos, algunos estructurales y otros de servicio. “cuando se determinan las dimensiones de la estructura del pavimento, se deben satisfacer los criterios del diseño estructural y del diseño del reservorio.” (Caltrans, 2014)

Los requisitos estructurales se rigen por las cargas de diseño, según la magnitud de la carga serán las dimensiones de las capas de la estructura. El diseño estructural considera cuatro elementos principales del sitio de construcción, estos son el tráfico total con el cual se determina el nivel de carga que debe resistir la estructura, la capacidad portante del

suelo, elementos ambientales como son los contaminantes y la configuración de la sección de pavimento a usar. Es importante aclarar que no en todos los casos se debe emplear la sección típica previamente descrita, para algunos casos se pueden omitir una o más capas dependiendo del nivel de servicio o condiciones meteorológicas del sitio. “En ocasiones la capa de asfalto puede estar en contacto directo con el suelo sin necesidad de contar con un reservorio, como lo es en el caso de zonas peatonales.” (Caltrans, 2014)

Por otro lado, los requisitos para que el diseño cumpla con un buen servicio están regidos en gran parte por el volumen de agua de escorrentía total, también conocido por sus siglas en inglés como “WQV”. Para iniciar el diseño del reservorio es indispensable realizar un estudio previo del sitio de construcción, para conocer parámetros del suelo como capacidad portante y capacidad de infiltración o permeabilidad. Además, se debe analizar la meteorología del sitio para determinar el WQV de diseño y posibles fuentes adicionales de escorrentía (las cuales se acotan a las zonas impermeables circundantes a la estructura PAP), el volumen de agua que deriva de estas fuentes adicionales se debe sumar al WQV. Con base en la capacidad de infiltración del suelo y el WQV se determina si es adecuada o no la implementación de una estructura permeable. “El éxito del diseño radica en la eficiencia con la que la estructura almacena el volumen total de agua, por un periodo estimado entre 24 y 72 horas. Tiempo suficiente para un tratamiento adecuado del agua.” (NAPA, 2017) Algunos reportes sugieren que el uso de estructuras permeables no es el indicado cuando se cuenta con suelos cuya tasa de infiltración es menor a 7.6 cm/hr, pues el diseño del reservorio demandaría dimensiones demasiado grandes u obras complementarias para la evacuación del WQV para evitar el ascenso del agua por la estructura del pavimento hasta llegar a la superficie. Este tipo de requerimientos podrían aumentar el costo al tal punto que la propuesta deja de ser atractiva. Finalmente se tomara el mayor de los espesores de capas solicitado por requerimientos estructurales y requerimientos hidrológicos.

2.2.2 Diseño hidrológico

El diseño hidrológico tiene como objetivo proporcionar las dimensiones óptimas para el almacenamiento del agua en la estructura por el tiempo necesario, hasta que esta se infiltre por completo en la rasante. “La capacidad de almacenamiento de un pavimento es igual al espacio vacío del reservorio.” (Bruce K. 2005) El espacio vacío se puede calcular como:

$$V_d = \frac{EVT}{TMT}$$

Donde:

Vd= Espacio vacío

EVT= Espesor equivalente de vacíos

TMT= Espesor total del reservorio

Mientras que para determinar el QVW de diseño con el cual se obtienen las dimensiones del reservorio, se deben analizar las distintas fuentes de agua que tiene el sistema. Primero se define el volumen de agua que se obtendrá solo por precipitación en el área superficial del proyecto durante el evento de lluvia más probable, este dato se obtiene de los registros hidrológicos de la zona en estudio.

Otra fuente de ingreso al sistema es el agua de escorrentía proveniente de aquellas zonas impermeables aledañas al área del proyecto. Para este cálculo se ha desarrollado una metodología de simple desarrollo, el método “SCS numero de curva” es el método más común utilizado para modelar los volúmenes de agua de escorrentía. Con la metodología SCS se calcula un delta de precipitación que se obtiene con la siguiente formula.

$$Q = \frac{(P-0.2 \times S)^2}{P+0.8 \times S} \quad , \quad Q = 0 \text{ si } p < 0.2S$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

Donde:

Q= Delta de precipitación (mm)

P=Precipitacion (mm)

S= retención máxima potencial

CN= SCS numero de curva

El coeficiente CN depende del grupo hidrológico al cual pertenece la superficie sobre la cual cae el agua, este puede tomar un valor entre 30 y 100. A continuación, se muestra las curvas SCS para diferentes valores de precipitación con sus correspondientes valores para el cálculo de la escorrentía.

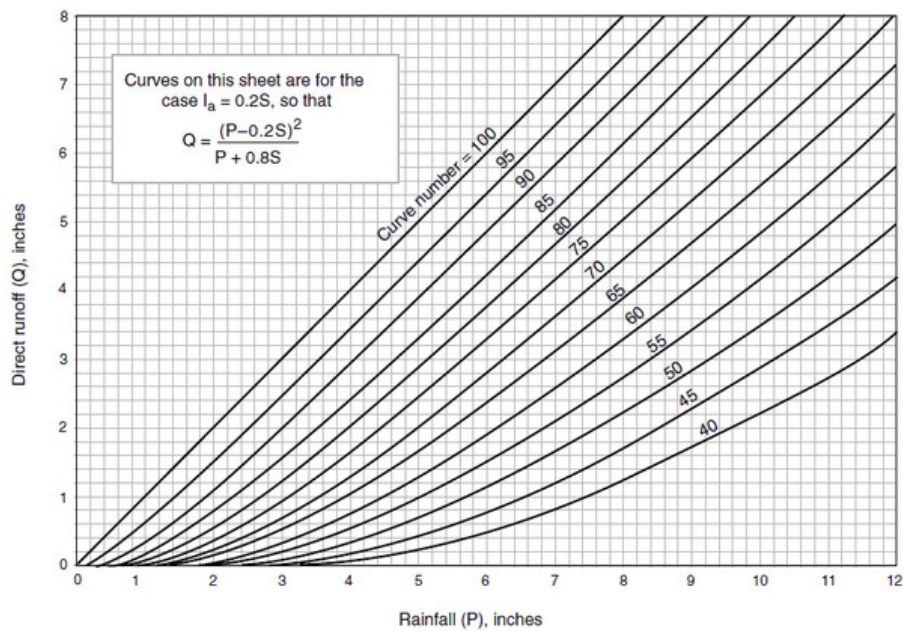


Figura 4 Curvas SCS ()

Una vez se conoce el WQV, como la suma del volumen de precipitación y el volumen por escorrentía, se deduce la altura que alcanzara el agua en la estructura. Con base en la

altura se calcula el tiempo que le toma a la estructura evacuar todo el WQV, mediante la siguiente formula.

$$Ti = \frac{Aw}{(Ks \times Sf)}$$

Donde:

Ti= Tiempo de inundación o tiempo de infiltración

Aw= Altura del agua

Ks=tasa de infiltración de la rasante

Sf= factor de seguridad (0-1)

Conocer el tiempo que le toma a la estructura evacuar el agua (tiempo de inundación) es sumamente importante, ya la estructura se considera eficiente si este valor es menor que el que se definió previamente como el límite superior igual a 72 horas.

Ya que el diseño se elabora teniendo en cuenta la condición de lluvia más probable y no la mayor para el sitio de construcción, si esta se llegara a presentar, el tiempo de evacuación podría ser mayor al de diseño y la estructura podría estar sujeta a condiciones de desbordamiento. Para prevenir esta condición, se puede acoplar un tubo perforado con un extremo hacia un canal de desbordamiento y el otro completamente embebido en la estructura de pavimento, para evacuar el exceso de agua que entra al sistema antes que esta se desborde de la estructura tal y como se muestra en la siguiente figura.

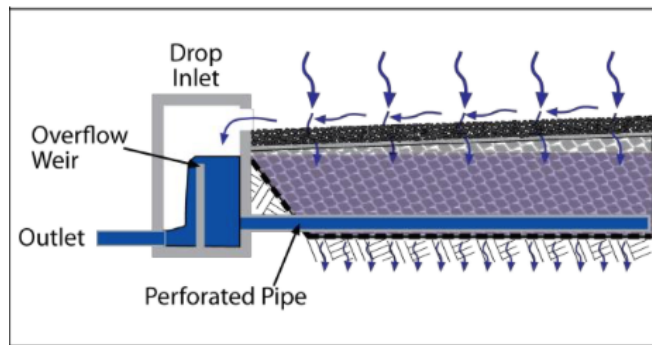


Figura 5 ilustración tubo de desagüe (Techbrief. 2017)

Por otra parte, la altura que tendrá la estructura se calcula utilizando la siguiente formula.

$$TMT = \frac{A_w}{V_d}$$

Donde:

TMT = Espesor total del reservorio

Aw = Altura del Agua

Vd = Espacio vacío

“Nótese que este simple cálculo no considera la infiltración que sucede durante el tiempo del evento de lluvia...esto es una aproximación conservadora durante el diseño.”(Bruce K. 2005) Con la altura obtenida y el tiempo de infiltración por debajo del máximo permisible, se cuenta con un diseño hidrológico confiable.

2.2.3 Diseño estructural

El diseño estructural se elabora según lo establecido por la norma AASHTO-93, el objetivo de este es garantizar que la altura de cada una de las capas de la estructura sea correcta y que esta resista satisfactoriamente las cargas de diseño durante un periodo de tiempo establecido. Básicamente el método describe un proceso cuyo objetivo no es más que

calcular el número estructural o “SN” por sus siglas en inglés y con base en este número es que se obtienen los espesores de las capas utilizando unas tablas propuestas por la ASSHTO.

Como es de esperarse, estos espesores dependen de las condiciones del suelo y la carga a la cual estará sometida esta estructura, sin embargo, el tiempo de diseño que se tomara en cuenta es determinante y se debe escoger cautelosamente, ya que este parámetro puede hacer variar mucho el espesor de las capas incrementando el precio de la estructura. A continuación, se describirán las variables que intervienen en el método.

Módulo de resiliencia

Para obtenerlo se deben realizar ensayos de laboratorio al suelo en cuestión. Como la resistencia del suelo puede variar dependiendo del contenido de humedad se deben tomar varias muestras con diferentes índices de humedad del mismo suelo evaluando así el comportamiento de éste durante las estaciones del año, o en el caso del trópico durante la época de lluvias e invierno. Para cada uno de estos valores de debe calcular un daño relativo asociado, mediante la formula $U_f = (1.18 \times 10^8) \times M_R^{-2.32}$ luego se obtiene un promedio anual de daños y el módulo de resiliencia que corresponda al resultado de dicho promedio es el que se debe utilizar. Por otra parte, se puede calcular el módulo de resiliencia en función del CBR obtenido mediante ensayos como, $M_R = 2555 \times \text{CBR}^{0.64}$ (TRRL, 1987). Algunas relaciones de CBR y MR según el tipo de suelo calculadas por la ASSHTO se muestran en la siguiente tabla.

Tipo de Sue	% CBR	M_R en (psi)
Arena	31	46500
Limo	20	30000
Arena magra	25	37500
Limo - arcilla	25	37500
Arcilla limosa	8	11400
Arcilla pesada	5	7800

Figura 6 Relaciones CBR vs MR (ASSHTO, 1993)

Periodo de diseño

Es el tiempo que se escoge para el cual el diseño debe satisfacer las exigencias de servicio y seguridad a un costo razonable. La ASSHTO considera que este tiempo es mayor al de la vida útil del pavimento ya que por lo general se incluye al menos una rehabilitación haciendo que este sea mayor a 20 años. Se sugiere tomar en cuenta los siguientes periodos de diseño, según el tipo de carretera.

Tipo de Carretera	Periodo de Diseño (Años)
Urbana de tránsito elevado.	30 – 50
Interurbana de tránsito elevado	20 – 50
Pavimentada de baja intensidad de tránsito	15 – 25
De baja intensidad de tránsito, pavimentación con grava	10 – 20

Figura 7 Periodos de diseño según el tipo de suelo (ASSHTO, 1993)

Índice de serviciabilidad

El índice de serviciabilidad se define como el nivel de integridad necesario del pavimento para que los usuarios de la vía puedan hacer uso de ella con seguridad y confort. Se debe elegir un límite inicial (P_o), Estudios indican que “Los pavimentos flexibles nuevos alcanzan un valor $P_o=4,2$ ” (ASSHTO-93). También se debe elegir un límite final (P_t), este indica el nivel más bajo que puede tolerar la estructura para su correcto funcionamiento antes de que sea necesaria una rehabilitación del pavimento. El valor P_t elegido depende de la importancia de la vía, para aquellas estructuras que estarán sometidas a un nivel de tránsito elevado el índice no debe estar por debajo de 2.5 mientras que, aquellas de menor tránsito el índice podrá ser igual a 2.

Perdida de del índice de serviciabilidad (PSI)

Se define como la diferencia entre P_o y P_t . Obteniendo así, $PSI = p_o - p_t$

Análisis del trafico

El análisis del tráfico tiene como objetivo determinar las cargas a las cuales estará sometida la estructura, estas cargas están condicionadas a el tipo de vehículo que transita por la vía ya sea Automóvil, Camión de dos ejes, camión de más de dos ejes, Bus, Motocicleta, etc. Cada uno de estos vehículos representan una cantidad de ejes que pasan por la estructura durante el periodo de diseño establecido. Para determinar el número de ejes y la carga que se transmite es necesario realizar un aforo inicial, adicionalmente, se debe tener en cuenta el periodo de diseño, la distribución de ejes por cada tipo de vehículo, el tránsito medio diario anual de todos los tipos de vehículos (TPDA), las tasas de crecimiento para cada tipo de vehículo, sentido del tráfico, carriles por cada sentido y, por último, factores de equivalencia de carga. A continuación, se describen cada uno de las variables.

Transito medio diario anual (TPDA)

Es el promedio del volumen de transito diario aforado durante un año.

Tasa de crecimiento

Representa el crecimiento anual del TPDA, cada tipo de vehículo tiene una tasa de crecimiento diferente.

Proyección del transito

Se debe garantizar que el diseño de la vía cumpla con el nivel de servicio requerido a lo largo del periodo de diseño estipulado por esto se hace necesario proyectar el tránsito.

Factor de crecimiento (FC)

La ASSHTO propone calcular el factor de crecimiento del tráfico para todo el periodo de diseño mediante la siguiente formula.

$$FC = (1 + r)^p - 1$$

Donde:

r= tasa de crecimiento anual (se debe ingresar en decimales)

p= periodo de diseño en años

Distribución direccional (Fd)

por lo general se traba una distribución direccional del 50% en cada dirección, en algunas ocasiones se puede disponer de una configuración diferente solo si las condiciones de la vía lo exigen.

Factor de distribución por carril (Fc)

El diseño de la estructura se realiza para un solo carril “el carril de diseño” y este se aplica para el resto de carriles que tenga la vía. Por eso es importante determinar el volumen de transito de este carril de diseño.

Para vías comunes de dos carriles con uno en cada dirección se determina que el factor de distribución es del 100%, mientras que para vías de múltiples carriles como una autopista el factor de distribución depende del número de carriles en cada dirección. La ASSHTO utiliza los siguientes valores.

No. carriles en c dirección	Porcentaje de ejes simples equivalentes 18 kips en el carril de diseño (F_c)
1	100
2	80 – 100
3	60 – 80
4 ó más	50 – 75

Figura 8 Factores de distribución para vías de múltiples carriles (ASSHTO, 1993)

Transito equivalente (ESAL)

El método sugiere que las solicitaciones de carga y daño que producen las diferentes configuraciones de ejes durante cada pasada, se pueden representar por un número equivalente de pasadas de un eje simple de 18 kip o 8,2 Toneladas o por sus siglas en inglés, “ESAL”, el cual equivale al eje de un camión.

Factores equivalentes de carga (LEF)

La conversión de los ejes de todos los diferentes tipos de vehículo a ESAL's se lleva acabo utilizando algunos factores de equivalencia a estos se les denomina "LEF". Estos factores expresan la relación de carga entre un eje de determinada configuración, con la carga de un eje ESAL.

$$LEF = \left(\frac{CARGA\ ESAL}{CARGA\ eje\ de\ configuracion\ determinada} \right)^4$$

Factor de camión (TF)

La metodología considera el factor de camión como el número de pasadas de un eje tipo ESAL corresponden al paso de un vehículo comercial pesado ya sea un bus o un camión. Para determinar este factor se pueden utilizar métodos de conteo y pesaje básicos con ayudas de algunas plantillas dispuestas por la ASSHTO y INVIAS para esto.

$$TF = \frac{N^{\circ}\ ESAL's}{N^{\circ}\ de\ camiones}$$

Numero de ejes ESAL equivalentes para el carril de diseño

Esta equivalencia se debe calcular para todo el periodo de diseño utilizando la siguiente ecuación.

$$ESAL's = \sum_{i=1}^m (p_i \times f_i \times P) \times (TPDA) \times (FC) \times F_d \times F_c \times 365$$

donde:

p_i = porcentaje de pasadas para un tipo de eje, sobre el total de pasadas de todos los ejes

f_i = factor de equivalencia para el tipo de eje en cuestión

P = promedio de ejes por camión

Coeficiente de drenaje (Cd)

El coeficiente de drenaje se calcula para aquellas capas de material granular como la base y sub-base, las cuales tienen la posibilidad de drenar agua. Este coeficiente depende del tiempo que le toma a determinada capa expulsar el agua por completo, además de, el tiempo durante un año que pasa la misma capa en condiciones próximas a la saturación. La ASSHTO cataloga la capacidad de drenaje en cinco categorías.

Calidad del Drenaje	Tiempo que tarda el agua en ser Evacuada
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Malo	1 mes
Muy malo	Agua no drena

Figura 9 Coeficientes de drenaje para capas de material granular (ASSHTO, 1993)

luego, de acuerdo con la capacidad de drenaje obtenida establece algunos factores de corrección; “m₁” para bases y “m₂” para sub-bases los cuales se encuentran tabulados y se presentan en la siguiente tabla.

Capacidad de Drenaje	% de tiempo en el que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación.			
	Menos del 1 %	1 a 5 %	5 a 25 %	Más del 25 %
Excelente	1,40 – 1,35	1,35 – 1,30	1,30 – 1,20	1,20
Bueno	1,35 – 1,25	1,25 – 1,15	1,15 – 1,00	1,00
Regular	1,25 – 1,15	1,15 – 1,05	1,00 – 0,80	0,80
Malo	1,15 – 1,05	1,05 – 0,80	0,80 – 0,60	0,60
Muy malo	1,05 – 0,95	0,95 – 0,75	0,75 – 0,40	0,40

Figura 10 Factores de corrección aplicables al drenaje (ASSHTO, 1993)

Nivel de confianza (R)

Para la ASSHTO la confiabilidad se define como la probabilidad de que la estructura que se diseña, cumpla satisfactoriamente las solicitudes de intemperismo y carga durante el periodo de diseño establecido, en otras palabras que las deformaciones y fallas se mantengan por debajo de un rango permisible. El nivel de confianza depende en gran medida del tipo de vía que se está diseñando, el método propone adoptar los siguientes valores.

Tipo de camino	Zonas urbanas	Zonas rurales
Autopistas	85 – 99.9	80 – 99.9
Carreteras de primer orden	80 – 99	75 – 95
Carreteras secundarias	80 – 95	75 – 95
Caminos vecinales	50 – 80	50 – 80

Figura 11 Valores para el nivel de confianza "R" (ASSHTO, 1993)

ya que el comportamiento real del pavimento y el comportamiento esperado en el diseño no son exactamente iguales la ASSHTO considera las diferencias como la desviación estándar (S_o) el cual se sugiere se encuentre en un rango de $0,4 < S_o < 0,5$, además, se calcula un factor de ajuste el cual se obtiene mediante el producto de la desviación estándar y la desviación normal (Z_R) cuyos valores se encuentran tabulados para diferentes valores de confiabilidad.

Confiabilidad	Z_R	Confiabilidad	Z_R
50	0	92	-1,405
60	-0,253	94	-1,555
70	-0,524	95	-1,645
75	-0,674	96	-1,751
80	-0,841	97	-1,881
85	-1,037	98	-2,054
90	-1,282	99	-2,327

Figura 12 Valores para la desviación normal " Z_R " (ASSHTO, 1993)

Determinación del numero estructural "SN"

El cálculo del numero estructural sobre la sub-rasante se lleva acabo utilizando la siguiente formula.

$$\text{Log}W_{18} = Z_R \cdot S_0 + 9.36 \cdot \text{Log}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log} \frac{(\Delta PSI)}{4.2 - 1.5}}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \text{Log}M_R - 8.07$$

Figura 13 Ecuación para el calculo de "SN" (ASSHTO, 93)

donde:

W_{18} = trafico equivalente

$$W_{18} = FC \times F_d \times \overline{W_{18}} ,$$

$$\overline{W_{18}} = \text{numero de ESAL's en ambas direcciones}$$

Determinación de los espesores de las capas

Tras haber calculado el SN se procede a determinar el espesor de las capas, ya que cada una de ellas tiene sus propias características se deben tener consideraciones particulares. El conjunto de estas capas debe proveer la resistencia equivalente al número estructural obtenido. La siguiente formula permite deducir los espesores para cada capa.

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times m_1 + a_3 \times D_3 \times m_3$$

en la anterior formula " a_1, a_2, a_3 " representan el coeficiente estructural de la carpeta asfáltica, la base y la sub-base respectivamente. Estos coeficientes corresponden a los módulos de resiliencia para cada capa y se deben obtener mediante ensayos.

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 MEMORIAS DE CALCULO DISEÑO ESTRUCTURAL

Se realiza un diseño estructural hipotético para obtener una estructura permeable de referencia que se pueda comparar con una estructura convencional. Como se expuso previamente este diseño involucra variables de tránsito y variables del sitio (características del suelo). El diseño se elabora a mano, y además se utiliza el software de diseño proporcionado por el ingeniero civil Luis R. Vásquez con el fin de proporcionar chequear los valores obtenidos. Ambos métodos tienen como base la metodología propuesta con anterioridad (ASSHTO 93). Se debe tomar en cuenta que al ser un ejercicio hipotético algunos valores de las formulas son valores mínimos permitidos por la norma o valores típicos de referencia.

3.1.1 Ubicación y caracterización del suelo

En cuanto a la ubicación del diseño se considera una vía con un nivel bajo de transito ubicada en el municipio de envigado, Alto de Las Palmas en inmediaciones de la Universidad EIA. Los datos del suelo en este lugar se obtienen de un estudio de suelos realizado por la empresa GEO2 S.A.S, el cual consta de dos apiques que se toman de los predios de la Universidad EIA. En la descripción del suelo que se extrae se detalla que el estrato superior tiene un alto contenido de materia orgánica, por esta razón se descarta y se trabaja con el segundo, en la figura a continuación se describen los estratos en estudio.

Profundidad (m)	Descripción geológica	Fotos
0,0 - 0,90	LLENO ANTRÓPICO ORGÁNICO Material heterogéneo de color gris y negro, limoso a limo-arcilloso con alto contenido de materia orgánica y raíces, contiene pequeños fragmentos de rocas de máximo 2 cm de diámetro. En general el contenido de humedad es medio, consistencia media y plasticidad media a baja.	
0,90 - 3,15	LLENO ANTRÓPICO PARDO Suelo limoso a limo-arcilloso de color pardo naranja con motas grises y verdes, heterogéneo, compuesto por materiales removidos de la zona, contiene esporádicos fragmentos rocosos de máximo 1cm de diámetro. En general el contenido de humedad es medio/alto, plasticidad media y consistencia media a baja.	

Figura 14 Descripción Apique (GEO2 S.A.S, 2016)

3.1.2 Módulo de resiliencia (M_R) del suelo

El módulo de resiliencia esta expresado en función del CBR de la subrasante en este caso del “Lleno Antrópico Pardo”. Este valor se obtiene mediante la correlación SPT-CBR descrita en la gráfica de abajo.

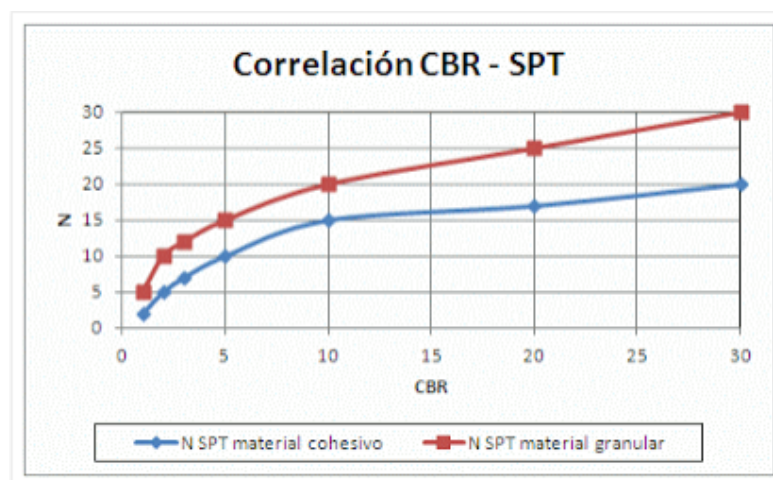


Figura 15 Correlación CBR-SPT (Junta De Andalucía, 2007)

Consecuente con lo anteriormente dicho se toma el valor promedio de golpes “N” del ensayo SPT realizado durante el apique igual a siete (7) golpes. Si se ingresa en la gráfica y

utilizando la curva para material cohesivo obtenemos un valor de CBR igual a 4. Acto seguido se procede a calcular el M_R correspondiente para este valor utilizando la fórmula propuesta por el Laboratorio De Investigación De Transporte Y Carreteras explicita en el literal 2.2.3 de este artículo.

Correlación CBR- SPT	
Promedio Golpes "N" SPT	7
Resultado correlación CBR	4%

Figura 16 Resultados Correlación CBR-SPT

Módulo De Resiliencia para la Sub-Rasante	
CBR	4%
MR (Psi)	6204,5

Figura 17 Resultado MR Sub-Rasante, fuente: Propia

3.1.3 Confiabilidad (R) y Desviación estándar normal (Z_R)

Dado que el factor de confiabilidad está en función de la importancia de la carretera y la seguridad del diseño, de la tabla propuesta por la AASHTO se escoge un valor de "R" igual a 70. Adicionalmente, para cada Factor "R" existe un valor de desviación estándar normal asociado.

Confiabilidad y DSV. EST Normal	
Tipo de via	Local
Factor "R"	70
DSV. EST Normal	-0,524

Figura 18 Resultados Confiabilidad "R" y Desviación estándar normal " Z_R ".

3.1.4 Desviación Estándar Combinada (S_0)

Dado que el rango para " S_0 " es de 0.4-0.5 entendiéndose como 0.4 como un diseño muy acertado con pocas probabilidades de fallar, se decide escoge un valor de 0,49 este es un valor conservador pero que permite tener tranquilidad al momento de someter la estructura a las cargas para las que fue diseñada.

3.1.5 Serviciabilidad (ΔPSI)

Ya que la serviciabilidad entre el estado inicial de la estructura de pavimento y el estado final antes de ser reparada. A causa de que una vía nunca queda en condiciones verdaderamente perfectas, se determina un estado inicial de 4,2 y un final de 2,5 que hace referencia a un estado donde ya se nota deterioro y es incómodo de transitar.

Serviciabilidad (ΔPSI)	
inicial	4,2
final	2,5
inicial-final	1,7

Figura 19 Resultado De Serviciabilidad, Fuente: Propia

3.1.6 Numero De Ejes W_{18} de 8,2 Ton

Partiendo de que es un diseño hipotético se toma el valor mínimo permitido por el Instituto Nacional De Vías, INVIAS, el cual es de 500,000 ejes de 8,2 Ton.

3.1.7 Coeficientes Estructurales (a_i)

Para obtener los coeficientes estructurales de la base y la sub-base se utilizan las figuras 23 y 24 respectivamente, los cuales están en función del módulo de resiliencia perteneciente a cada capa. Se utilizan entonces valores típicos para los módulos de las capas propuestos por el INVIAS en su manual de rehabilitación de pavimentos asfálticos

de carreteras, se deben considerar que tanto la base granular como la su-base granular se compactan al 95% y la gradación propuesta es la que se encuentra en la figura 2 de este documento.

Por otra parte, el coeficiente estructural de la capa de rodadura se determina el módulo dinámico de la mezcla asfáltica para lo cual es necesario determinar la temperatura de pavimento en °F, mediante la expresión de Witzack

$$T_{pav} = T_{med} * \left(1 + \frac{1}{z + 4}\right) - \left(\frac{34}{z + 4}\right) + 6$$

La temperatura media (T_{med}) de Rionegro es de 18.5°C (80°F), para determinar la temperatura de pavimento se evalúa para un espesor (h) de mezcla asfáltica inicial de 7.6 cm (3 ") y una profundidad de 1,9 cm (3/4") el valor de z se calcula como la relación entre la profundidad y el espesor de pavimento que para el caso es de 0,25, con lo cual se obtiene una temperatura de pavimento de 78,7°F (25.9°C)

Teniendo en cuenta que la vía tiene un tránsito principalmente de vehículos livianos y por ser la vía de uso institucional la velocidad (V) de estos con el proyecto de pavimentación se estima en 40 km/h, se determina el tiempo de aplicación de carga (t) y la frecuencia (f) en Hz correspondiente a esta velocidad y el espesor propuesto (h) en cm de acuerdo con las siguientes expresiones

$$\log t = 0.005h - 0.2 - 0.94\log V$$

$$f = \frac{1}{2\pi t}$$

Con lo cual se obtiene un tiempo de aplicación de carga t de 0,021 s y una frecuencia f de 7,4 Hz

El módulo dinámico de la mezcla asfáltica se determina con base en la expresión de la Guía AASHTO MEPDG

$$\log E^* = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(t_r)}}$$

En donde:

E^* es el módulo de la mezcla en psi

δ , α , β , γ son constantes que corresponden al tipo de mezcla y asfalto utilizado, para el caso de la mezcla drenante del tipo Open Graded con asfalto modificado tipo II suministrada por Construcciones El Cóndor, se tiene en la siguiente imagen los parámetros de la mezcla y el asfalto evaluados.

Equation Coefficients					Binder Coefficients	
delta δ	alpha α	beta β	gamma γ	C	A	VTS
1.6096	4.7346	-1.4783	0.2100	2.0161	9.5450	-3.1510

Figura 20 Parámetros de la curva maestra de módulos mezcla Open Graded Fuente (HQ Humberto Quintero, 2016)

t_r corresponde al tiempo de aplicación de carga a la temperatura de referencia 21.1°C (70°F), este se calcula con la siguiente expresión

$$\text{Log}(t_r) = \log(T) - C \log A(T)$$

En donde:

T es el período de aplicación de carga correspondiente al inverso de la frecuencia f

C es una constante que depende del tipo de mezcla, para la open Graded es 2.0161

$\log A(T)$ corresponde a un factor de ajuste en función de la viscosidad (η) del asfalto, la temperatura de diseño y la temperatura de referencia ambas en °R, se calcula con las siguientes expresiones:

$$\eta_i = 10^{A+VTS \log(T_i)}$$

$$\log A(T) = \eta_r - \eta_d$$

En donde:

η_i corresponde al log de la viscosidad a las temperaturas de referencia η_r y de diseño η_{dis}

A y VTS corresponden a constantes determinadas a partir del análisis reológico del asfalto a diferentes temperaturas, para el caso del asfalto tipo II estas corresponden a 9.545 y - 3.151 respectivamente.

Teniendo en cuenta lo anterior y para temperaturas de referencia 529.7 °R (21.1°C) y de diseño 538.3°R (25.9°C), reemplazando estos valores en las ecuaciones anteriores se obtiene un valor de log A(T) de -0.46, y un valor de log (t_r) de 0.05

Con lo cual se obtiene finalmente un valor de modulo dinámico a una temperatura de 25,9°C y una frecuencia de 7.4 Hz para una mezcla drenante Open graded elaborada con asfalto modificado tipo II de 286506 psi equivalentes a 20148 kg/cm²

El valor del coeficiente de capa para el concreto asfáltico calculado a partir de la expresión $a_1 = 0.1745 \ln(E^*) - 1.8307$ para un módulo de 286506 psi es de 0.35

Esta mezcla es considerada por el INVIAS en el artículo 453-13 como una mezcla drenante tipo 1 modificada con un contenido de vacíos entre 15-20%, la gradación corresponde a la que se presente en la figura 20.

TIPO DE MEZCLA	TAMIZ (mm / U.S. Standard)						
	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
% PASA							
ÚNICA	100	70-100	50-75	15-32	9-20	5-12	3-7
TOLERANCIAS EN PRODUCCIÓN SOBRE LA FÓRMULA DE TRABAJO (±)	4 %			3 %			1 %

Figura 21 Franja Granulométrica Mezcla Drenante. Fuente (INVIAS, 2007)

A continuación, se presentan los módulos propuestos para las capas de la estructura.

Modulos De Resiliencia (PSI)	
Base Granular	35000
Sub-base Granular	15000

Figura 22 Módulos Para Las Capas De La Estructura, Fuente: Propia

El valor del coeficiente " a_2 " correspondiente al de la base granular se obtiene ingresando por el costado derecho de la figura 21 con el valor del módulo que se propone (35000 psi) y se lee el valor del coeficiente en la margen izquierda. Este procedimiento se repite para el coeficiente " a_3 " pero en la figura 24 y con el valor correspondiente para la sub-base.

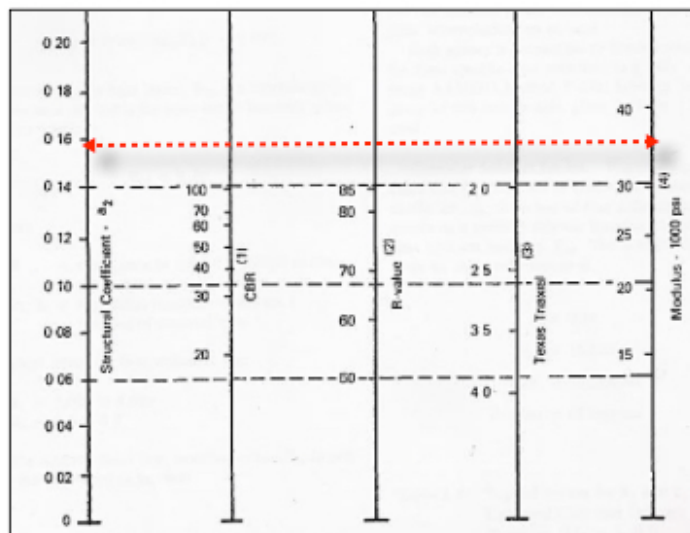


Figura 23 Coeficiente Estructural " a_2 ", fuente: ASSHTO-93

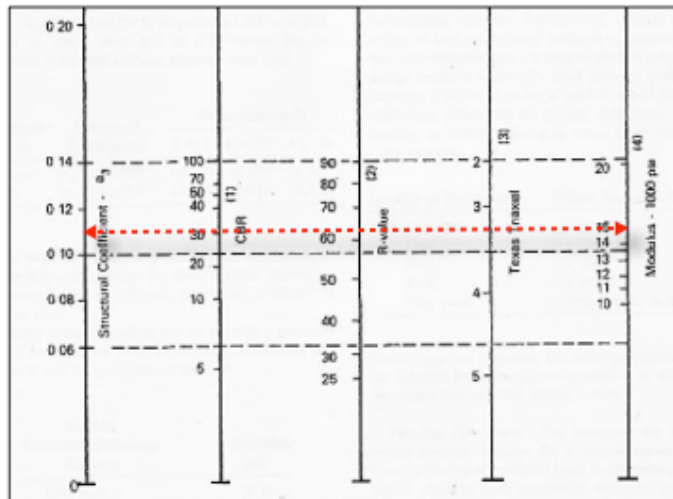


Figura 24 Coeficiente Estructural "a3", fuente: ASSHTO-93

Finalmente se tiene los siguientes resultados para los coeficientes estructurales.

Coeficientes Estructurales "ai"	
Carpeta asfalto "a1"	0,35
Base "a2"	0,16
Sub- Base "a3"	0,11

Figura 25 coeficientes estructurales, Fuente: Propia

3.1.8 Coeficientes De Drenaje (m_i)

Los coeficientes de drenaje se estiman según lo que se indica en la figura la cual depende de la capacidad del material para drenar agua, que está en función de las horas que este estará en contacto con el agua y además del porcentaje del año que estará la estructura sometida a condiciones de lluvia.

Capacidad de Drenaje	% de tiempo en el que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación.			
	Menos del 1 %	1 a 5 %	5 a 25 %	Más del 25 %
Excelente	1,40 – 1,35	1,35 – 1,30	1,30 – 1,20	1,20
Bueno	1,35 – 1,25	1,25 – 1,15	1,15 – 1,00	1,00
Regular	1,25 – 1,15	1,15 – 1,05	1,00 – 0,80	0,80
Malo	1,15 – 1,05	1,05 – 0,80	0,80 – 0,60	0,60
Muy malo	1,05 – 0,95	0,95 – 0,75	0,75 – 0,40	0,40

Figura 26 Tabla de coeficientes de drenaje "mi". Fuente: ASSHTO 93

Para determinar la capacidad de drenaje de la estructura de pavimento, se utilizó el software "DRIP" por sus siglas en inglés para "requerimientos de drenaje en pavimentos" de autoridad ASSHTOWARE. Este software depende de algunas características geométricas como ancho de calzada, pendiente longitudinal y transversal. Para el diseño se tomaron carriles de 3.65 metros de ancho y bermas de 1 metro de ancho. La pendiente longitudinal se establece como la máxima permitida por las limitaciones de los pavimentos permeables que es igual al 5% y finalmente la pendiente transversal se establece en 2% correspondiente al bombeo. Por otra parte, se debe ingresar las características de los materiales que componen la estructura como el peso del material, la gravedad específica y la gradación correspondiente a la de un material que el programa trae por omisión cuya identificación es ASSHTO#67 esta simula de manera adecuada una gradación para una estructura permeable, con esto el programa calculara un coeficiente de permeabilidad. Finalmente, el programa considera la altura del fluido en la estructura el cual corresponde a la intensidad de precipitación para calcular la capacidad de drenaje de la estructura que para este caso resulta ser excelente. A continuación, se presentan las imágenes correspondientes al software.

b

7.3

m

c

1.

m

☒ Cross-slope (Geometry A)
 ☐ Uniform slope (Geometry B)

$$W = \frac{b}{2} + c$$

W

4.65

m

S

0.0500

m/m

S_x

0.0200

m/m

$$S_R = \sqrt{S^2 + S_x^2}$$

S_R

0.0539

m/m

$$L_R = W \sqrt{1 + \left(\frac{S}{S_x}\right)^2}$$

L_R

12.52

m

Geometry A

Geometry B

Figura 27 Características geométricas de calzada. Fuente: (DRIP, 2018)

☒ Range
 ☐ Value

Sieve (mm)	Lower Bound	Upper Bound
0.001		
0.002		
0.020		
0.075		
0.150		
0.212		
0.250		
0.300		
0.425		
0.600		
0.931		
1.18		
2.00		
2.36	0.	5.0
4.75	0.	10.0
9.5	20.0	55.0
12.5		
19.0	90.0	100.0
25.0	100.0	100.0
37.5		
50.0		
63.0		
75.0		
90.0		

Add

Remove

Material Library

AASHTO #67

☒ Base
 ☐ Subgrade
 ☐ Separator layer
 ☐ Include aggregate separator

Gradation Analysis

P ₂₀₀	0.53	%
D ₁₀	5.3650	mm
D ₁₂	5.6225	mm
D ₁₅	6.0213	mm
D ₃₀	8.2437	mm
D ₅₀	11.2621	mm
D ₆₀	12.7912	mm
D ₈₅	17.0882	mm
C _u	2.38	
C _c	2.38	

Porosity

Unit Weight

1650.

kg/m³

Specific Gravity

2.65

n

0.377

Effective Porosity

☒ Water Loss Method
 ☐ Water Content Method

Water Loss

%

n_e

0.294

k

5026.584

m/d

Figura 28 Características del material. Fuente (DRIP, 2018)

☒ Infiltration Ratio Method
☐ Crack Infiltration Method

Infiltration Method
☐ Portland Cement Concrete
☒ Asphalt Cement Concrete

\bar{x} C

Note: Appropriate values for C range from 0.33 to 0.50

☒ 1-Year, 1-Hour Rainfall : FHWA-TS-80-224
☐ 2-Year, 1-Hour Rainfall : FHWA-SA-92-008

R mm/hr

Note: 1-Hour rainfall amounts are recorded in in./hr.

q_i m³/s/m²

$q_i = CRF$

☐ Include meltwater in inflow calculations.
 Meltwater

Heave mm/day

k_{sub} m/day

γ_s kg/m³

γ_b kg/m³

H_s m

H m

$\sigma = \gamma_s H_s + \gamma_b H_b$

σ kg/m²

q_m m³/s/m²

Figura 29 Parámetros Hidrológicos. Fuente: (DRIP, 2018)

Analysis Type
☒ Time-to-Drain
☐ Depth-of-flow

n_e

k m/d

S_R m/m

L_R m

S % n

$U = (n - s \cdot n) / n_e$

H m

U %

☒ Barber and Sawyer Equation
☐ Casagrande and Shannon Method

t hr

☒ 50% Drainage (AASHTO Guide)
☐ 85% Saturation (Pavement Rehabilitation Manual)

Quality of Drainage	Time to Drain
Excellent	2-Hours
Good	1-Day
Fair	7-Day
Poor	1-Month
Very Poor	Does Not Drain

Figura 30 Calculo de Capacidad de Drenaje. Fuente: (DRIP, 2018)

Para calcular el valor del coeficiente de drenaje “mi” se debe conocer la probabilidad de la estructura de estar expuesta a condiciones de saturación, esta probabilidad se determina a partir de los datos publicados por el portal climatológico “weather spark”. En Medellín se puede identificar una temporada seca y una temporada mojada, distribuida de la siguiente manera.

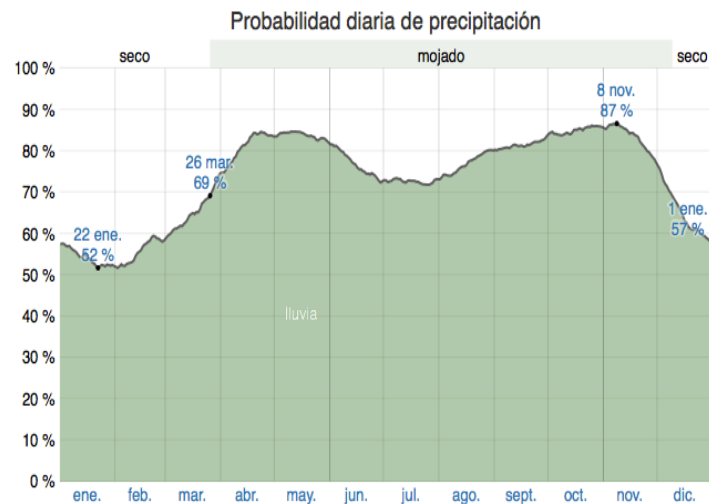


Figura 31 Probabilidad De Precipitación en Medellín, Fuente: (Weather Spark, 2018)

Para calcular la probabilidad de precipitación se realizó un cálculo conservador considerando un promedio ponderado con la probabilidad media de lluvia correspondiente a cada temporada. Siendo así se tiene una temporada mojada de 8,5 meses de duración con una probabilidad del 78% de ocurrencia de precipitación, y una temporada seca de 3,5 meses de duración con una probabilidad de 54,5% de ocurrencia de precipitación. Esto nos da una probabilidad media de ocurrencia de precipitación de 71,1%, así que en el grafico tomamos el valor de la columna del extremo derecho como se muestra a continuación.

Coeficientes De Drenaje "mi"	
Carpeta asfalto "m1"	-
Base "m2"	1.2
Sub- Base "m3"	1.2

Figura 32 Valores De "m_i" Para Las Capas De La Estructura, Fuente: Propia

3.1.9 Cálculo Del Número Estructural Requerido (SN*)

Al remplazar los valores en la fórmula propuesta antes para el cálculo del número estructural se obtiene un valor de SN igual a 2.95.

3.1.10 Cálculo De Espesores De La Estructura

Teniendo los coeficientes estructurales y de drenaje para cada una de las capas de la estructura, se procede a determinar los espesores necesarios para cumplir con el número estructural necesario. Para la capa de rodadura y la capa correspondiente a la base granular, se utilizan espesores que superen a los mínimos permitidos por el manual de diseño de pavimentos publicado por el INVIAS, se establecen entonces estos espesores en "D1" igual a 3 pulgadas y "D3" igual a 6 pulgadas. Esto significa que el número estructural de la estructura permeable dependerá del espesor del reservorio ("D₃"). El cual se despeja de la fórmula propuesta anteriormente.

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times m_1 + a_3 \times D_3 \times m_3$$

A continuación, se muestra una tabla con todos los parámetros de la estructura permeable.

Diseño De Pavimento Permeable	
a1	0.35
D1	3
a2	0.16
m2	1.2
D2	6
a3	0.11
m3	1.2
D3	6
SN	2.994

Figura 33 Diseño Pavimento Permeable. Fuente: Propia

3.1.11 Diseño Paralelo Estructura Convencional

Ya que se pretende realizar una comparación de la estructura permeable con una estructura tradicional, se realiza un diseño adicional con los coeficientes estructurales y de drenaje correspondientes a los de una estructura tradicional. De igual manera que para el caso anterior el coeficiente estructural de la mezcla se calcula con base en los parámetros de la curva maestra de módulos para una “Mezcla Asfáltica Semi-Densa en Caliente tipo MSC-19”, la cual se ha utilizado por la empresa “Construcciones El Cóndor S.A.” anteriormente para proyectos con características similares al del caso en estudio.

Equation Coefficients					Binder Coefficients	
delta δ	alpha α	beta β	gamma γ	C	A	VTS
2.3832	4.0618	-1.5839	0.2139	1.9305	10.9060	-3.6500

Con base en estos parámetros se determino mediante la ecuación de MEPDG un valor de módulo dinámico de 498163 psi equivalente a 35033 kg/cm² y un coeficiente de capa de 0.46.

Por otra parte, se utilizarán los mismos coeficientes estructurales de la base y sub-base que se utilizaron anteriormente. Se tiene entonces los siguientes valores para los coeficientes estructurales.

Coeficientes Estructurales "a _i "	
a ₁	0.46
a ₂	0.16
a ₃	0.11

Figura 34 Coeficientes Estructurales Para La Estructura Convencional, Fuente: Propia

Luego se calculan los coeficientes de drenaje utilizando nuevamente el Software “DRIP”. Con la diferencia de que en este caso se tomó en cuenta una granulometría para una muestra tipo. La cual corresponde a una Base Granular #38 cuya gradación se muestra en las siguientes imágenes.

The screenshot displays the DRIP software interface with the following sections:

- File Options Help** (Menu bar)
- Road Geometry** (Tab):
 - W : 4.65 ft
 - S_R : 0.0539 ft/ft
 - L_R : 12.52 ft
- Materials** (Tab):
 - Base - Defined
 - Subgrade - Undefined
 - Separator - None
- Inflow** (Tab):
 - q_i : 5.8395e-006 ft³/d/ft²
 - q_m : ft³/d/ft²
- Permeable Base** (Tab):
 - H : 0.4 ft
 - U : 50. %
 - t : 153.79 hr
 - q_d : ft³/d/ft
- Edge Drain - Pipe** (Tab):
 - D : in
 - L_o : ft
 - Q : ft³/d
- Roadway Geometry** (Tab):
 - b : 7.3 m
 - c : 1. m
 - ☒ Cross-slope (Geometry A)
 - ☐ Uniform slope (Geometry B)
 - Equation: $W = \frac{b}{2} + c$
 - W : 4.65 m
 - S : 0.0500 m/m
 - S_x : 0.0200 m/m
 - Equation: $S_R = \sqrt{S^2 + S_x^2}$
 - S_R : 0.0539 m/m
 - Equation: $L_R = W \sqrt{1 + \left(\frac{S_x}{S}\right)^2}$
 - L_R : 12.52 m
- Diagrams**:
 - Geometry A**: Cross-slope diagram showing width b , offset c , and slope S_x .
 - Geometry B**: Uniform slope diagram showing width b , offset c , and slope S_x .
 - 3D Cross-section**: Shows layers: Pavement, Subgrade, Edgedrain pipe, Geotextile, Trench, Permeable Separator base, and Separator layer.
 - 2D Slope Diagram**: Shows the relationship between S , S_x , S_R , L_R , and W .

Figura 35 Características Geometricas de La Calzada, Fuente: (DRIP, 2018)

☒ Range ☐ Value

Sieve (mm)	Lower Bound	Upper Bound
0.001		
0.002		
0.020		
0.075	5.0	15.0
0.150		
0.212		
0.250		
0.300		
0.425	10.0	30.0
0.600		
0.931		
1.18		
2.00		
2.36	20.0	45.0
4.75	30.0	60.0
9.5	45.0	75.0
12.5		
19.0	60.0	90.0
25.0	70.0	100.0
37.5	100.0	100.0
50.0		
63.0		
75.0		
90.0		

Add Remove Material Library **BG38**

☒ Base ☐ Subgrade ☐ Separator layer ☐ Include aggregate separator

Gradation Analysis

P_{200} 10.00 %

D_{10} 0.0750 mm

D_{12} 0.1202 mm

D_{15} 0.2106 mm

D_{30} 1.8328 mm

D_{50} 6.1348 mm

D_{60} 9.5000 mm

D_{85} 25.0000 mm

C_u 126.6 C_c 126.6

Porosity

Unit Weight 1650. kg/m³

Specific Gravity 2.65

n 0.377

Effective Porosity

☒ Water Loss Method ☐ Water Content Method

Water Loss %

n_e 0.151

k 1.580 m/d

Figura 36 Características De Material. Fuente: (DRIP, 2018)

☒ Infiltration Ratio Method ☐ Crack Infiltration Method

Infiltration Method

☐ Portland Cement Concrete ☒ Asphalt Cement Concrete

C 0.33

Note: Appropriate values for C range from 0.33 to 0.50

☒ 1-Year, 1-Hour Rainfall : FHWA-TS-80-224 ☐ 2-Year, 1-Hour Rainfall : FHWA-SA-92-008

R 63.7 mm/hr

Note: 1-Hour rainfall amounts are recorded in in/hr.

q_i 5.8395e-006 m³/s/m²

$q_i = CRF$

☐ Include meltwater in inflow calculations.

Meltwater

Heave mm/day

k_{sub} m/day

γ_s kg/m³

γ_b 1650. kg/m³

H_s m

H 0.4 m

$\sigma = \gamma_s H_s + \gamma_b H_b$

σ kg/m²

q_m m³/s/m²

Figura 37 Parametros hidrologicos. Fuente (DRIP, 2018)

Analysis Type
☒ Time-to-Drain
☐ Depth-of-flow

n_e 0.151
 k 1.580 m/d
 S_R 0.0539 m/m
 L_R 12.52 m

S % n 0.377
 $U = (n - s \times n) / n_e$
 H 0.4 m
 U 50. %

☒ Barber and Sawyer Equation
☐ Casagrande and Shannon Method

t 159.79 hr

PLAN
 SECTION

☒ 50% Drainage (AASHTO Guide)
☐ 85% Saturation (Pavement Rehabilitation Manual)

Quality of Drainage	Time to Drain
Excellent	2-Hours
Good	1-Day
Fair	7-Day
Poor	1-Month
Very Poor	Does Not Drain

Figura 38 Calculo de Capacidad de Drenaje Estructura Tradicional. Fuente (DRIP, 2018)

Siguiendo con el lineamiento del diseño anterior se toma el valor para los coeficientes de drenaje de la tabla propuesta por la ASSHTO 93. Se tiene entonces los siguientes coeficientes de drenaje.

Coeficientes De Drenaje "mi"	
Carpeta asfalto "m1"	-
Base "m2"	0.8
Sub- Base "m3"	0.8

Figura 39 Coeficientes De Drenaje "mi".

Para el cálculo de los espesores de esta estructura se toma en consideración que se debe superar el mismo número estructural de 2.95 y que los espesores para la carpeta asfáltica y base granular serán iguales al diseño anterior, así que solo varia el espesor de la sub

base granular debido a que esta es la de menor costo por unidad de material. El diseño final para el pavimento tradicional es el siguiente.

Diseño De Pavimento Tradicional	
a1	0.46
D1 (pulg)	3
a2	0.16
m2	0.8
D2 (pulg)	6
a3	0.11
m3	0.8
D3 (pulg)	9
SN	2.95

Figura 40 Diseño Pavimento Tradicional. Fuente: Propia

La estructura es de mayor envergadura que la estructura permeable, debido a la baja capacidad de drenaje que tiene esta estructura.

MEMORIAS DE CALCULO DISEÑO HIDROLOGICO

De igual manera se realiza un diseño hidrológico hipotético, aunque la vista típica transversal de los pavimentos permeables tiene cinco capas, este no es el único diseño que existe. Para este caso en particular se realizará un diseño hidrológico que considere una carpeta asfáltica, una base granular y una sub-base granular que a la misma vez funcionará como un reservorio que almacenará el agua por el tiempo requerido, que deberá estar comprendido en un rango de ente 24 y 72 horas. El objetivo de este diseño es entonces determinar un espesor de la sub-base que proporcione un volumen de espacios vacíos adecuado para almacenar el total de escorrentía de un evento determinado. Para esta operación se considera que durante el evento de precipitación no habrá infiltración, es decir que se almacenara todo el volumen de agua que cae y luego de haber terminado el evento se cuenta el tiempo de infiltración.

3.1.12 Tasa de Infiltración De la Rasante (K)

Se realizó un ensayo de permeabilidad con cabeza constante, a una muestra de suelo tomada en la universidad EIA. Esta se llevó acabo en el laboratorio de suelo de la Sede de Zúñiga de la universidad EIA.



Figura 41 Montaje Del Permeámetro, Fuente: Propia.

Este ensayo no se pudo concluir puesto que las boquillas de las mangueras que conectan las mangueras del permeámetro con la muestra creando una línea de corriente, se bloqueaban con el material cohesivo, causando que en un mes completo de ensayo solo se desplazara una pequeña cantidad de agua por medio de esta línea.



Figura 42 Ensayo De Permeabilidad después de un mes. Fuente: Propia

Por sugerencia de la jefa de laboratorios de suelo y profesora de la Universidad EIA, se toma un valor referente de permeabilidad para este tipo cercano a los $K = 10^{-6}$ m/h. Por otra parte, en la bibliografía se puede encontrar que los suelos compuestos por arcilla limos y que son arenosos tienen una permeabilidad típica de $K = 0,17$ pulg/hora (Ferguson. B, 2005). Lo que equivale a unos 4,31 mm/hora.

3.1.13 Porcentaje De Espacios Vacíos

El porcentaje de espacios vacíos óptimo para el reservorio, se encuentra dentro de un rango que va desde 30% hasta 40% (Ferguson. B, 2005). De igual manera se realizó un simple ensayo para determinar el volumen de espacios vacíos de una muestra de agregado de tamaño $\frac{3}{4}$. El ensayo constaba de un tubo de ensayo que se llenaba con una muestra de tamaño nominal $\frac{3}{4}$ de pulgada hasta marcar un nivel de 400 ml, posteriormente se toma otro tubo de ensayo, el cual inicialmente está lleno con 500 ml de agua, para verterlo en el material granular hasta alcanzar la marca de los 400 ml. Por consecuencia el volumen de agua que se vertió en el tubo de ensayo de material granular será equivalente al volumen de espacios vacíos. El ensayo se repitió tres veces y se tomó el promedio como el valor de espacios vacíos de la muestra.



Figura 43 Ensayo De Espacios Vacios, Fuente: Propia

Ensayo De Espacios Vacíos	
primer Resultado	
volumen Agregados (ml)	400

volumen Agua inicial (ml)	500
volumen Agua Final (ml)	311
porcentaje espacios vacíos	47%
Segundo Resultado	
volumen Agregados (ml)	400
volumen Agua inicial (ml)	500
volumen Agua Final (ml)	315
porcentaje espacios vacíos	46%
Tercer Resultado	
volumen Agregados (ml)	400
volumen Agua inicial (ml)	500
volumen Agua Final (ml)	310
porcentaje espacios vacíos	47%
Promedio	46,6%

Figura 44 Espacios Vacíos De La Muestra. Fuente: Propia

Se toma entonces el valor más cercano del rango permisible de espacios vacíos igual a 40% se puede considerar la diferencia a modo de factor de seguridad.

3.1.14 Precipitación - Volumen De Agua A Almacenar

Se utilizaron las curvas de intensidad, duración y frecuencia, calculadas por el IDEAM y propuestas para la ciudad de Medellín para obtener la cantidad de agua que se debe recoger para un evento de lluvia. En estas curvas se puede leer la cantidad de agua en milímetros que caen sobre la superficie en función de la duración del evento y el periodo de retorno que se escoja.

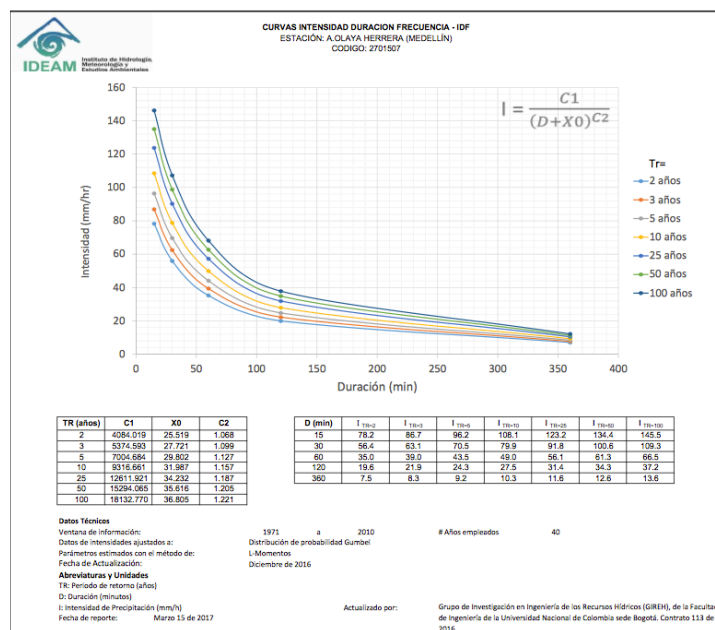


Figura 45 Curvas IDF Para Medellín. Fuente: (IDEAM, 2018)

Se selecciona un evento con un periodo de retorno de 3 años y una duración de 30 minutos, lo cual se podría catalogar como un evento convencional o frecuente. Con esta configuración se lee los siguientes resultados en la curva IDF.

Precipitación	
Periodo de retorno (Años)	3
Duración (Min)	30
Intensidad (mm/hr)	63,1

Figura 46 Precipitación, Fuente: propia

3.1.15 Calculo De Espesor De Reservorio Necesario

Se debe garantizar el cumplimiento de dos condiciones, dado que se recogerá todo el volumen de agua resultado del evento de precipitación diseño antes de comenzar a infiltrarlo, el volumen de espacios vacíos debe mayor que el volumen de agua. Por otra parte, se debe garantizar que el tiempo de infiltración no sea mayor a 72 horas. Ya que por los requerimientos estructurales la sub-base no puede ser menor a 7 pulgadas, es decir, 178 milímetros, primero se evaluará si este espesor cumple también los requerimientos hidrológicos. Se toma un área referente de un metro cuadrado y como el evento generará una lámina de agua de 63,1 milímetros de altura el volumen deberá ser mayor a este resultado. Se obtiene la altura libre del reservorio multiplicando el porcentaje de espacios vacíos por la altura total del reservorio, obteniendo una altura de 71,2 milímetros que es suficiente para almacenar todo el volumen de agua.

Espesor Espacios Vacíos	
VD (%)	40%
TMT (mm)	152
EVT (mm)	91.2

Figura 47 Altura Del Reservorio, Fuente: Propia

Acto seguido se verifica que el tiempo de infiltración por parte de la Sub-Rasante no sea mayor a 72 horas, para este cálculo se debe afectar la tasa de infiltración del suelo por un factor de seguridad que varía entre 0 y 1, se tomó un valor medio de 0,5 por el nivel de

incertidumbre que se tiene sobre este dato del suelo, esto hará que se reduzca la tasa de infiltración a la mitad.

Tiempo De Infiltración	
Aw (mm)	63,1
Ti (hr)	29,28

Figura 48 Tiempo De Infiltración, Fuente: Propia

El tiempo de infiltración claramente no supera el periodo máximo, lo que significa que el diseño estructural es predominante sobre el hidrológico.

3.2 COMPARACIÓN DE COSTOS

A pesar de que los materiales y la metodología de diseño empleada para la construcción de los pavimentos tradicionales y los pavimentos permeables o drenantes es similar hay variaciones de costos específicos entre estos. Para realizar esta comparación de costos se entrevistó a la ingeniera Beatriz Agudelo encargada del área comercial de la empresa Concretos & Asfaltos S.A, donde se investigo acerca de los precios unitarios incluyendo el transporte hasta el sitio de obra. A continuación, se presentan unas tablas de costos de material para los dos tipos de pavimentos.

Tabla De Costos De Materiales Pavimento Tradicional				
ITEM	Unidad	Cantidad Por Metro	Precio COP	TOTAL
Mezcla tradicional	m3	0.70866	\$650.000	460.629
Base (¾ pulgada)	m3	1.41732	\$ 95.000	\$ 134.645
Sub-base (2 pulgadas)	m3	2.12598	\$ 90.000	\$ 191.338
Cuneta	metro lineal	1	\$70.000	\$70.000
			Suma	\$856.613

Figura 49 Tabla de Costos Pavimento Tradicional. Fuente: (Concretos & Asfaltos S.A, 2018)

Tabla De Costos De Materiales Pavimento Permeable				
ITEM	Unidad	Cantidad Por Metro	Precio COP	TOTAL
Mezcla Especial	m3	0.70866	\$850.000	602.361
Base (¾ pulgada)	m3	1.41732	\$ 95.000	\$ 134.645
Sub-base (2 pulgadas)	m3	1.41732	\$ 90.000	\$ 127.559
Geotextil (polipropileno)	Metro lineal	1	\$9.000	\$9.000
			Suma	\$873.565

Figura 50 Tabla De Costos Pavimento Permeable. Fuente: (Concretos & Asfaltos S.A, 2018)

En los catálogos de la empresa Concretos & Asfaltos S.A no hay un precio referente para las mezclas drenantes puesto que no se han comercializado, pero existen otro tipo de mezclas especiales que cuyo precio se incrementa en un aproximado de entre 150,000 y

200,000 pesos colombianos. Por recomendación de la ingeniera Beatriz Agudelo se toma un valor referente de 200,000 COP. De las tablas se puede apreciar que los precios para la base y sub-base son iguales y como se previno anteriormente la diferencia de precios radica en el costo de la mezcla asfáltica, la implementación o no de sistemas de drenaje complementarios como lo son las cunetas, que para pavimentos tradicionales se hacen necesarios para conducir el agua de escorrentía desde la capa de rodadura hasta la red de alcantarillado. Para el caso del pavimento drenante se recomienda la instalación de mallas de geotextil en tela que permita el flujo de agua, pero evite la migración de finos desde la sub rasante hacia la estructura que más adelante causen una colmatación indeseada. A simple vista se puede confirmar que el pavimento permeable es más costoso que el pavimento tradicional y la diferencia se hace aun mayor cuando el área cubrir con pavimento incrementa.

3.3 EVALUACIÓN COMPARATIVA DE ASPECTOS AMBIENTALES

Aunque el alcance y la disponibilidad de tiempo predispuesto para este trabajo de grado, no permiten realizar ensayos que posibiliten analizar cuál es realmente el grado de diferencia entre los impactos ambientales generados por un pavimento tradicional y un pavimento tradicional, en este informe se registraran las características halladas por medio de otros trabajos y/o estudios realizados por empresas. Esto da paso para que en otro trabajo de grado posterior se realicen ensayos que permitan cuantificar las diferencias entre los impactos ambientales causados por uno y otro tipo de pavimento.

Primero se identifican los impactos ambientales negativos que se derivan de la impermeabilización de la superficie terrestre con estructuras de pavimento bituminoso tradicional y luego se identifica si esta condición mejora o empeora con el uso de pavimentos permeables. En la bibliografía de “Porous Pavements” de Bruce K. Ferguson, el autor resalta algunos impactos ambientales que son causados por la impermeabilización del terreno natural. Cuando llueve sobre una superficie impermeable como las calles o los techos, el agua logra transportar una gran cantidad de contaminantes provenientes del entorno como metales, hidrocarburos y material particulado, hacia las fuentes de agua como ríos, estanques, represas e incluso los acuíferos subterráneos. En algunos casos estos contaminantes son tóxicos para la flora y fauna de las fuentes hídricas, si este tipo de agentes tóxicos entra en contacto con una fuente que se utilice para el consumo humano

el daño será aún mayor. En cambio, los pavimentos permeables permiten que el agua en vez de transportar estos contaminantes de la superficie de rodadura hasta las fuentes hídricas, se infiltren en la estructura y de allí al suelo, este proceso hace las veces de filtro y el agua al llegar a los acuíferos esta mucho más limpia, las experiencias provenientes de la empresa constructora de pavimentos permeables TARMAC TopMix lo soportan. Otro inconveniente que se presenta al momento de construir pavimentos impermeables es el incremento en el volumen y caudal de agua en las fuentes hídricas, a causa de la escorrentía superficial, este volumen sería equivalente a la cantidad de agua que se genere en el evento de precipitación multiplicada por el área impermeabilizada, en una gran ciudad cuyo suelo sea muy impermeable es decir que este cubierto por calles y techos se podría esperar un gran volumen adicional en las fuentes hídricas solo por escorrentía. Esto a la vez incrementaría la velocidad del flujo, aumentando el riesgo de ocasionar algún desastre natural aguas abajo. Con los pavimentos permeables se puede esperar una gran reducción de este caudal adicional por escorrentía ya que gran parte de este volumen de agua se infiltrará en el suelo de manera gradual hasta llegar a los acuíferos naturales de manera segura. En Chile de un estudio hidrológico y ambiental se determinó que “un caudal de 10 L/s/ha en una urbanización con 90% de área impermeable, se produce en promedio 6 veces por año, o sea 12 veces más frecuente que para el caso de una impermeabilidad del 10%.” (Fernandez B. 2008) esto demuestra que una zona donde el porcentaje de impermeabilidad es menor, hay menos probabilidad de tener un caudal excesivo que pueda generar desastres naturales a causa de las lluvias. La fabricación de concreto tiene viene asociado a la emisión de gases de efecto invernadero y muchas de las obras de canalización de aguas lluvia o de escorrentía se deben construir en este material. Como lo vimos en el diseño del pavimento permeable, este permite prescindir de este tipo de obras, siendo un beneficio económico y ambiental. Por otra parte, se podría considerar que los pavimentos permeables son amigables con los “árboles urbanos” llamaremos así a los árboles que se encuentren rodeados por estructuras de pavimentos tal y como se muestra en la figura.



Figura 51 "Arboles Urbano" Fuente: (Ferguson. B, 2005).

Es común encontrar que estos árboles se marchiten como el de la fotografía dado que su suministro de agua se limita al área descubierta la cual claramente no es suficiente para preservar la vida del espécimen. En contra parte a esto los pavimentos permeables podrían suministrar la cantidad de agua necesaria para que los árboles se puedan desarrollar correctamente. Sin embargo, se debe garantizar que las raíces del árbol no afecten de manera negativa la estructura del pavimento. Finalmente se identifican las islas de calor y el ruido provocado por el tránsito de los vehículos, para ambos casos se logró identificar una mejoría al implementar pavimentos porosos, este al tener espacios vacíos reduce el nivel de sonido generado por las ruedas ya que permite que el aire ingrese a estos espacios absorbiendo energía y sonido, y para el caso de las islas de calor de igual manera la estructura absorbe energía y calor.

CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Aunque la manera de diseñar y construir un pavimento permeable es bastante similar a como se hace con un pavimento tradicional ambos son diferentes, es importante recalcar que este tipo de pavimentos no están diseñados para escenarios con grandes volúmenes de tránsito, esto se puede explicar de manera fácil con el concepto de ángulo de fricción el cual se resume en la capacidad del pavimento de resistir esfuerzos cortantes. El ángulo de fricción está en función de la trabazón que existe entre las partículas del material, en un pavimento poroso esta trabazón disminuye a causa de la curva de gradación necesaria para generar los espacios vacíos que ocupara el volumen de agua y por esta razón también se reduce el ángulo de fricción el cual de cierta manera describe la resistencia del pavimento a las cargas de diseño. Esto da paso a que en futuras investigaciones se investigue y cuantifique la pérdida de resistencia que tienen estas estructuras frente a las convencionales.

Para el caso de estudio abarcado en este trabajo de grado se logró determinar que la tendencia en cuanto precios se mantiene con referencia a los estudios realizados en otros países. Se analizó que una estructura permeable es alrededor de un 0 - 5% más costosa que una convencional, básicamente porque el precio de la mezcla es más elevado alrededor de 30 % más que la convencional. Un análisis más enfocado al precio permitió concluir que este tipo de pavimentos se vuelven competitivos en vías cuyo ancho de calzada no es muy grande, la razón radica en que para vías angostas el impacto por el precio que se deja de pagar por las cunetas que se construyen a ambos lados es más significativo que en una vía ancha. En cuanto al mantenimiento este también es más costoso ya que se debe cuidar que la estructura no se colmate y deje de infiltrar el agua, para esto se aspira la superficie de la vía con cierta periodicidad dependiendo de la cantidad de partículas a las que este expuesto el pavimento en su día a día.

Aunque las evidencias descritas en este informe datan de que los pavimentos permeables ayudan en el manejo ambiental de las aguas de escorrentía, previenen desastres naturales causados por el incremento de caudal en las fuentes hídricas, disminuyen las islas de calor al interior de las ciudades, disminuyen el sonido emitido por el contacto entre la superficie de las ruedas y el pavimento y que además permiten el correcto desarrollo de los árboles

urbanos, es completamente necesario cuantificar en qué proporción se presentan estas mejoras. Este Trabajo de grado pretende dar paso a futuras investigaciones que permitan estudiar estos fenómenos a fondo para concluir si las mejoras son significativas y ameritan los sobrecostos que se presentan. Para esto se necesita construir un prototipo de estudio y diseñar algunos ensayos que permitan un mejor entendimiento del trasfondo ambiental de las estructuras de pavimento permeable.

Por otra parte, se propone una investigación posterior cuyo objetivo sea el de extender la aplicabilidad de los pavimentos permeables a zonas con inclinaciones superiores a las actualmente limitan este tipo de proyectos, esto con el fin de que esta alternativa se adapte a la geomorfología del territorio nacional y además proponer una mejora de la estructura que permita el tránsito de vehículos pesados que es la gran limitante de las estructuras permeables.

REFERENCIAS

- BAÑÓN, L., BEVIÁ, JF (2000), Manual de Carreteras vol. 2: Construcción y mantenimiento, Ed. Enrique Ortiz e Hijos.
- California department of transportation. (2014). Previous pavement design. Sacramento, California: Caltrans.
- Bruce K. Ferguson. (2005). Porous Pavements. New York: Taylor & Francis.
- Trujillo A, Quiroz D. (2013). Pavimentos porors utilizados como sistemas alternativos al drenaje urbano, Bogota-Colombia..
- D'Alessandro, V., Meizi, S., Sbrosi, M., & Brusarosco, M. (2012). Phenomenological analysis of hydroplaning through intelligent tyres. *Vehicle System Dynamics*, 503-18
- Rondón-Quintana, H. A., Fernández-Gómez, W. D., & Zafra-Mejía, C. A. (2016). Behavior of a warm mix asphalt using a chemical additive to foam the asphalt binder. *Revista Facultad De Ingenieria Universidad De Antioquia*, (78), 129-138. doi:10.17533/udea.redin.n78a1
- José Fernando Jiménez Mejía. (2015). La urbanización y los vehículos motorizados aumentan las temperaturas en Medellín. 2/04/2017, de Universidad nacional de Colombia Sitio web: <http://minas.medellin.unal.edu.co/noticias/facultad/298-la-urbanizacion-y-los-vehiculos-motorizados-aumentan-las-temperaturas-en-medellin>
- Ongley, E.D. (1997). Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Estudio FAO Riego y drenaje-55. 2/04/2017 (<http://www.fao.org/docrep/W2598s/W2598s00.htm>)
- Luo, H., Luo, L., Huang, G., Liu, P., Li, J., Hu, S., ... Huang, X. (2009). Total pollution effect of urban surface runoff. *Journal of Environmental Sciences*, 21, 1186–1193.
- Instituto Nacional de Vías. (2007). Especificaciones y normas INV-07. Colombia.

- DISEÑO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO POR EL METODO AASHTO-93 EMPLEANDO EL SOFTWARE DISAASHTO-93. (n.d.). Retrieved from <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/7544/1/GARCIAMORALESANDRESRICARDO2015.pdf>
- CASTRO, M. (2011). Pavimentos Permeables como alternativa de drenaje urbano. Trabajo de Grado, 90. Retrieved from <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/7483/1/tesis599.pdf>
- ccac17f74898f03b60d89bd6216138ed92c4a6b4 @ www.urbanarbolismo.es. (n.d.). Retrieved from <https://www.urbanarbolismo.es/blog/uso-de-pavimentos-permeables/>
- Clima-promedio-en-Medellín-Colombia-durante-todo-el-año @ es.weatherspark.com. (n.d.). Retrieved from <https://es.weatherspark.com/y/22535/Clima-promedio-en-Medellín-Colombia-durante-todo-el-año>
- curvas-idf @ www.ideam.gov.co. (n.d.). Retrieved from http://www.ideam.gov.co/curvas-idf?p_p_id=110_INSTANCE_WiU2xPoyv4KA&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&_110_INSTANCE_WiU2xPoyv4KA_struts_action=%2Fdocument_library_display%2Fview_file_entry&_11
- De, C. T., Secado, A. P. O. R., En, D. E. L. O. S. A., Suelto, E., Sulfato, S. D. E., Magnesio, D. E. S. O. D. E., ... Agregados, D. E. N. L. O. S. (2007). Mezcla drenante, 1–8. Retrieved from <http://giv.com.co/invias2013/453 MEZCLA DRENANTE.pdf>
- H. U. Bahia, Bosscher, P. J., Christensen, J., & Hu, Y. (2000). Layer Coefficients for New and Reprocessed Asphaltic Mixes, (January), 129. Retrieved from <http://wisconsin.gov/documents2/research/97-02layercoefficients.pdf>

